

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ



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



Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»
Кафедра інформаційних систем і технологій
Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної
державної адміністрації (Україна)
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Національний лісотехнічний університет України
Сілезька академія (Польща)
Краківська політехніка імені Тадеуша Костюшки (Польща)
Роуанський університет (США)
Вища школа міжнародного бізнесу ISM (Словаччина)
Природний заповідник «Розточчя»
SoftServe
Національний Еразмус+ офіс в Україні

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

Колективна монографія

Опублікована за результатами II Міжнародної науково-практичної конференції
«Інформаційні технології у сфері захисту довкілля»

Львів

2025

УДК 004:502

DOI <http://doi.org/10.35668/978-617-8683-00-9>

Рекомендовано до видання Вченою Радою ВСП «Навчально-науковий інститут просторового планування та перспективних технологій» Національного університету «Львівська політехніка», протокол №10 від 21 травня 2025 року.

Рецензенти (редактори):

Ростислав Ткачук

Rostyslav Tkachuk

доктор технічних наук, професор, начальник кафедри управління інформаційною безпекою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

Іван Дияк

Ivan Dyiak

доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету прикладної математики та інформатики Львівського національного університету імені Івана Франка

Богдан Поберейко

Bohdan Pobereiko

доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національного лісотехнічного університету України

Інформаційні технології у сфері захисту довкілля : колективна монографія / за загальною редакцією Р. Ткачука, І. Дияка, Б. Поберейка // за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 15-16 травня 2025 р.). Львів. 2025. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/uk/itep-2025>

ISBN 978-617-8683-00-9 (on-line)

До колективної монографії включені результати наукових досліджень авторів за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології у сфері захисту довкілля» (Львів, 15-16 травня 2025 р.).

УДК 004:502

Відповідальний за випуск – Андрій Лагун

Матеріали подано в авторській редакції.

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

ISBN 978-617-8683-00-9

© Авторський колектив, 2025

© Національний університет
«Львівська політехніка», 2025

ЗМІСТ

Баран Мар'яна ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ НА ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ В МІСТАХ	5
Батьковець Наталія ЕКОНОМІКО-ЕКОЛОГІЧНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ СПРИЧИНЕНИМИ РОСІЙСЬКОЮ АГРЕСІЄЮ В УКРАЇНІ	12
Bernatska Nataliia, Typilo Iryna, Bernatskyy Orest DESIGNING AN AIR QUALITY MONITORING SYSTEM IN SHELTERS BASED ON IOT TECHNOLOGIES AND THE HOME ASSISTANT SOFTWARE ENVIRONMENT	18
Бслянська Олександра ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТУ АМОНІЮ	24
Войтусік Степан, Ісаков Олександр ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЦИФРОВОГО, МАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ	30
Гембарська Наталія ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ВИТРАТАМИ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ПІДПРИЄМСТВА	37
Даценко Людмила, Тітова Світлана, Дубницька Маргарита ВІДБУДОВА УКРАЇНИ: КРАЩІ ПРАКТИКИ ТА ВИКЛИКИ СЬОГОДЕННЯ	44
Казимира Ірина, Загвойський Ростислав, Омелюх Степан РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІОТ РІШЕНЬ ТА ML-МОДЕЛЕЙ	53
Карабчук Дмитро, Скольський Ігор, Довбенко Володимир ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ: НА ПРИКЛАДІ БІОСФЕРНОГО РЕЗЕРВАТУ «РОЗТОЧЧЯ»	63
Кобильник Тарас PÜTHON ЯК ЗАСІБ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ	73
Кузик Олег, Даньків Олеса, Угрин Леся МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ У ПОРУВАТИХ СТРУКТУРАХ З ВИКОРИСТАННЯМ WOLFRAM MATHEMATICA ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕКОЛОГІЧНИХ ФІЛЬТРІВ	80
Kukharska Nataliia, Semenyuk Serhiy INFORMATION SYSTEMS FOR MONITORING FOREST ECOSYSTEMS IN GLOBAL AND REGIONAL CONTEXT	88
Lagun Andrii DESIGNING INFORMATION SYSTEMS FOR DETERMINING THE CARBON BALANCE OF FORESTED AREAS	103
Лагун Ярослав, Стахів Роман ВІДКРИТІ ІОТ-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ОГЛЯД І ВИКЛИКИ	110
Майструк Наталія ТРАНСНАЦІОНАЛЬНА ПОЛІТИКА ЄС В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: РИЗИКОЛОГІЧНИЙ НАПРЯМ ДОСЛІДЖЕНЬ EU TRANSNATIONAL POLICY IN THE CONTEXT OF GLOBAL DIGITAL TRANSFORMATIONS: RISKY RESEARCH DIRECTION	120

Машевська Марта, Куліш Богдан ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ ВІД ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ МАЛОГО БІЗНЕСУ	126
Мокрий Володимир, Арустамян Едуард, Бондарь Валерія МОДУЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ СОЗООЛОГІЧНИХ БАЗ ДАНИХ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «ПІВНІЧНЕ ПОДІЛЛЯ»	140
Нестер Анатолій ДОСЯГНЕННЯ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ	146
Олексюк Ганна, Попадинець Назарій, Лагун Андрій ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНТЕГРОВАНОМУ ЕКОЛОГІЧНОМУ ПРОСТОРИ СУЧАСНОГО МІСТА	153
Садура Оксана ІНСТРУМЕНТИ ФІНАНСУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ВІЙНИ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ МІСЦЕВОГО САМОВРЯДУВАННЯ	160
Сенета Зоряна, Сенета Мар'яна ТЕХНОЛОГІЇ СМАРТ-ТУРИЗМУ ЯК ОДИН ІЗ НАПРЯМІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ	166
Слюсарчук Арсен ІШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ТРАСУВАННІ ЕНЕРГОПОТОКІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ	175
Угрин Леся ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ОЦІНЦІ ВПЛИВУ ВИПАРІВ ГРИБОВЕЦЬКОГО СМІТТЄЗВАЛИЩА НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	182
Харів Андріана АВТОМАТИЗОВАНЕ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕЗАКОННИХ ЗВАЛИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ	188
Cherepanyn Roman, Franchuk Mykhailo USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN NATURE CONSERVATION: EXPERIENCE OF IMPLEMENTING SENSING CLUES TOOLS IN UKRAINE	196
Чешенко Дмитро, Мацуга Ольга ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ НАВЧАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ХВОРОБ РОСЛИН	205
Щербан Ореста, Цубов Леонід, Квасній Любов ЕКОІНДУСТРІАЛЬНІ ПАРКИ ЯК МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В УКРАЇНІ	213

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ НА ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ В МІСТАХ

Баран Мар'яна

Національний університет «Львівська політехніка»

Інститут просторового планування та перспективних технологій

Україна

mariana.m.baran@lpnu.ua

Abstract. The paper examines the importance of a system for studying the impact of vehicle emissions on the environment and human health. It highlights the system's role in environmental monitoring, assessing public health impacts, analyzing non-climatic changes, and developing effective environmental regulations. The work analyzes the environmental impact of road transport, emphasizing its role as a major source of urban air pollution. It discusses greenhouse gas emissions, harmful substances, and their effects on human health and the climate. The development of a system for studying the impact of vehicle emissions is described in detail, utilizing MySQL, C#, ASP.NET MVC, and fuzzy logic technologies. This system enables data analysis, real-time pollution tracking, and provides information to support decision-making aimed at improving the environmental situation.

Key words: atmospheric pollution, road transport, monitoring system.

Анотація. У роботі розглядається важливість системи дослідження впливу викидів автомобільного транспорту на довкілля та здоров'я людей. Підкреслюється її роль в екологічному моніторингу, оцінці впливу на здоров'я населення, аналізі поза кліматичними змінами та розробці ефективних екологічних норм. У роботі проаналізовано вплив автотранспорту на довкілля, підкреслюючи його роль як значного забруднювача атмосфери в містах. Розглядаються викиди парникових газів, шкідливі речовини та їх дослідження для здоров'я людей і клімату. Детально розкрито створення системи для дослідження впливу викидів від автотранспорту, яка використовує технології MySQL, C#, ASP.NET MVC та нечітку логіку. Система дозволяє аналізувати дані, відстежувати забруднення в реальному часі та надавати інформацію для прийняття рішень щодо покращення екологічної ситуації.

Ключові слова: забруднення атмосфери, автомобільний транспорт, система моніторингу.

Автомобільний транспорт є однією з головних причин забруднення повітря в міських територіях, що має значний вплив на довкілля та здоров'я населення. З ростом урбанізації та збільшенням кількості автомобілів на дорогах, питання якості повітря стає все більш актуальним. Викиди від автотранспорту включають парникові гази, такі як вуглекислий газ (CO₂), а також інші шкідливі речовини, включаючи оксиди азоту (NO_x), тверді частки (PM) та летючі органічні сполуки (ЛОС). Ці забруднювачі негативно впливають на атмосферу, спричиняючи проблеми з диханням, алергічні реакції та серцево-судинні захворювання серед міського населення.

Основними джерелами викидів автомобільного транспорту є двигуни внутрішнього згоряння, які спалюють паливо, виділяючи шкідливі речовини в атмосферу. Крім того, знос шин, гальмівних колодок та дорожнього покриття додає тверді частки, які погіршують якість повітря. У міських умовах ці забруднювачі концентруються через щільну забудову, низьку швидкість руху транспорту та недостатню вентиляцію. Це призводить до створення так званих "гарячих точок" забруднення, де рівень шкідливих речовин перевищує допустимі норми.

Вплив автомобільного транспорту на якість повітря має далекосяжні наслідки. Погана якість повітря негативно впливає на здоров'я людей, особливо дітей, людей

похилого віку та осіб з хронічними захворюваннями. Дослідження показують, що тривале вдихання забрудненого повітря може призвести до розвитку респіраторних та серцево-судинних захворювань, а також сприяти передчасній смертності. Крім того, забруднення повітря впливає на продуктивність праці, знижує якість життя та підвищує витрати на охорону здоров'я.

Для боротьби з цими проблемами уряди та міські адміністрації впроваджують різноманітні заходи, такі як обмеження на використання автомобілів з високим рівнем викидів, створення зон з обмеженим рухом та стимулювання використання електромобілів та гібридних транспортних засобів. Однак ці заходи часто виявляються недостатніми, оскільки вони не завжди враховують специфіку міських умов та поведінку водіїв. Тому розробка ефективних систем моніторингу та управління якістю повітря стає важливим завданням для міст.

Ця робота присвячена дослідженню впливу автомобільного транспорту на якість повітря в міському середовищі. Її метою є створення системи, що дозволить відстежувати та аналізувати рівень забруднення повітря в реальному часі, виявляти джерела викидів та розробляти стратегії для їх зменшення. Така система має потенціал для покращення якості життя містян, зниження витрат на охорону здоров'я та сприяння стійкому розвитку міст.

Кожен вид транспорту асоціюється з різними викидами забруднювачів [1]. Основні забруднювачі включають:

Оксиди азоту (NO_x), які можуть викликати численні проблеми з диханням, навіть при концентраціях у межах дозволених норм. Національний стандарт для діоксиду азоту (NO_2) становить 200 ppb у середньому за 1 годину та 100 ppb у середньому за 24 години.

Вуглекислий газ (CO_2) не є шкідливим для здоров'я людини безпосередньо, але є одним із головних парникових газів, відповідальних за підвищення глобальної температури. Рівні CO_2 : 400 ppm (середній рівень зовнішнього повітря), 400–1000 ppm (типовий рівень у житлових приміщеннях з хорошим повітрообміном), 1000–2000 ppm (сонливість, відсутність повітря), 2000–5000 ppm (головні болі, застаріле повітря), 5000 ppm (незвичайні умови повітря), 40000 ppm (надзвичайно шкідливий через брак кисню).

Тверді частки (PM10, PM2.5, PM1), які утворюються через стирання елементів автомобіля та неповне згоряння палива. Вони є поширеними забруднювачами, особливо в громадському транспорті, таких як метро. ВООЗ встановила стандарти для PM2.5: середньодобова концентрація – 25 мікрограмів на кубічний метр, річна – 10 мікрограмів на кубічний метр. Для PM10: середньодобова – 50 мікрограмів на кубічний метр, річна – 20 мікрограмів на кубічний метр. Для PM1: річні межі – 10 мікрограмів на кубічний метр.

Окис вуглецю (CO), який утворюється через неповне згоряння, може бути токсичним. Рівні CO: 0–9 ppm (без ризику), 10–29 ppm (хронічні проблеми, такі як головні болі), 30–35 ppm (грипоподібні симптоми у молоді та літніх), 36–99 ppm (грипоподібні симптоми у всіх), 100+ ppm (важкі симптоми, включаючи пошкодження мозку).

Летючі органічні сполуки (ЛОС), які виділяються при спалюванні палива, разом із NO_2 є попередниками тропосферного озону, що спричиняє численні проблеми в містах.

Діоксид сірки (SO_2), характерний для морського транспорту, досягає найвищих концентрацій у портових районах. Рівні SO_2 : добрий – менше 100, задовільний – 100–200, поганий – 200–300, дуже поганий – 300–600, надзвичайно поганий – більше 600.

Шум, хоча часто ігнорується, також впливає на якість повітря та загальне самопочуття людей.

Одним із ключових заходів для зменшення негативного впливу транспорту є моніторинг якості повітря в реальному часі. Це дозволяє:

- Зменшити викиди забруднювачів, виявляючи "гарячі точки" з високим рівнем забруднення.

- Сприяти стійкій мобільності, підвищуючи обізнаність населення та стимулюючи використання громадського транспорту.

- Швидко реагувати на надзвичайні ситуації, пов'язані зі збільшенням викидів.

Основною небезпекою забруднення повітря від транспорту є парниковий ефект, спричинений викидами CO₂. Це призводить до підвищення глобальної температури, посушливості в зернових регіонах та підвищення рівня океану через танення льодовиків.

Громадський транспорт є важливим інструментом для зменшення забруднення повітря. Він дозволяє скоротити кількість приватних автомобілів на дорогах, що знижує викиди. Уряди в усьому світі впроваджують ініціативи для підтримки громадського транспорту, включаючи субсидії, розвиток електричних та гібридних транспортних засобів, а також оптимізацію маршрутів для зменшення споживання палива. Ці заходи сприяють покращенню якості повітря та зменшенню заторів у містах.

Для порівняння та аналізу розглянемо існуючі системи визначення екологічної ситуації, які є доступні на просторах Інтернету:

- SaveEcoBot
- Eco-City

Сайт “SaveEcoBot”: <https://www.saveecobot.com/radiation-maps> [2]. Єдиний в Україні екологічний чат-бот, який поєднує дані про забруднення, забруднювачів та інструменти захисту довкілля. Дані про якість повітря в Україні збирає зі всіх наявних станцій моніторингу якості повітря – органів влади, громадських, комерційних. Агрегує всю наявну в Україні екологічну інформацію про забруднювачів, яка зберігається і передається онлайн, частково заміщаючи функції держави. На перший погляд сайт є новим, функціональним, легким у розумінні та чудово розробленим. Кожна зона має показники забруднення, які промальовані різним кольором, відповідно до рівня забруднення.

Сайт “Eco-City”: <https://eco-city.org.ua/> [3]. “Eco-City” зберігає відкритий набір даних забруднення повітря. На даній сторінці користувач може переглянути рівні забруднення у вигляді різнокольорових крапок. Визначити цей рівень можна за допомогою шкали поділу кольорів відповідно до показників. Встановити карту забруднення повітря можна також на смартфон. Додатково, для кожної категорії якості повітря прописані рекомендації дій на відкритому повітрі та приміщенні, а також інформація для уразливих та чутливих груп населення.

У роботі описано розроблення системи моніторингу екологічного впливу [4-6] автомобільного транспорту на атмосферне повітря в містах. Для реалізації проекту було обрано ефективні технології та інструменти, зокрема:

- Для бази даних – MySQL з графічним інтерфейсом MySQL Workbench.
- Мова програмування C# з технологією MVC ASP.NET для створення веб-додатка.

Основні вимоги, які ставилися до системи:

- Аналіз факторів забруднення та методи оцінки впливу на атмосферу.
- Розробка моделі оцінки ризиків на основі нечіткої логіки.
- Аналіз та вибір технологій для програмної реалізації.
- Створення бази даних та системи контролю впливу на автотранспорт.
- Розробка користувацького інтерфейсу.

Система моніторингу повітря складається з чотирьох компонентів: спостереження, аналіз, дія та зберігання. Спостереження забезпечується технічними засобами, що обробляються компонентом аналізу, який, за потреби, запускає компонент дії для реагування на зміни стану повітря.

Система VTPM інтегрує моніторинг забруднення з відстеженням транспортних засобів, надаючи дані про забруднення в реальному часі. На відміну від традиційних систем, VTPM вимірює порушення на дорогах, забезпечуючи точніші дані. Інформація передається на сервер для аналізу тенденцій та планування.

Для реалізації системи вибрано наступні технології: C#, ASP.NET, MySQL, MVC ASP.NET, HTML, CSS, JS та ML.NET для інтеграції штучного інтелекту. ML.NET

дозволяє використовувати машинне навчання в Visual Studio, а ASP.NET Core забезпечує кросплатформну розробку веб-додатків з високою продуктивністю. C# є мовою програмування загального призначення, яка використовується для реалізації логіки системи. HTML, CSS і JavaScript використовують для створення інтерфейсу користувача.

Для створення системи було використано машинне навчання (ML). Машинне навчання є одним із ключових інструментів сучасних інформаційних технологій, який дозволяє створювати системи, здатні самостійно аналізувати дані, виявляти закономірності та прогнозувати результати без прямого програмування кожного окремого сценарію. Особливу роль машинне навчання відіграє у вирішенні екологічних задач, зокрема у дослідженні впливу шкідливих викидів автотранспорту на навколишнє середовище в міських умовах.

Використання машинного навчання дає змогу будувати моделі, які здатні обробляти великі обсяги даних з датчиків якості повітря, метеостанцій та інших джерел. Це дозволяє в режимі реального часу оцінювати рівень викидів шкідливих речовин, визначати основні джерела забруднення та передбачати екологічні ризики, що і передбачено у створеній системі для дослідження викидів від автомобільного транспорту. Однією з основних переваг машинного навчання є його здатність працювати з неповними, шумними або нечіткими даними, що особливо важливо для екологічного моніторингу. Оскільки нечітка логіка є ще одним важливим інструментом, який доповнює можливості машинного навчання, то вона дозволяє оперувати поняттями ступеня істинності. Це дає можливість більш гнучко моделювати реальні екологічні процеси, які часто мають розмитий характер. Наприклад, замість чіткого поділу на "чисте" і "забруднене" повітря, система може працювати з рівнями забруднення "низький", "помірний", "високий" тощо.

В інтеграції машинного навчання і нечіткої логіки створюються нейро-нечіткі системи, які поєднують здатність до навчання з гнучкістю у прийнятті рішень в умовах невизначеності.

Розробка системи для дослідження впливу шкідливих викидів передбачає побудову бази даних для збереження інформації про виміри забруднення, параметри транспорту та погодні умови. Для цього використовуються сучасні технології, такі як MySQL для зберігання даних, C# для обробки інформації та побудови моделей, а ASP.NET MVC для створення веб-інтерфейсу користувача. Нечітка логіка впроваджується на етапі аналізу даних і моделювання ситуацій, що дозволяє врахувати широкий спектр варіацій у поведінці забруднення.

Система має можливість аналізувати дані у реальному часі, виявляти тенденції зростання концентрації шкідливих речовин та генерувати попередження для користувачів або органів влади. Машинне навчання також використовується для побудови моделей прогнозування, що дозволяє заздалегідь визначати можливі піки забруднення і вживати необхідних заходів для їх мінімізації.

Важливо, що використання машинного навчання дозволяє системі з часом покращувати точність своїх прогнозів за рахунок накопичення нових даних та самооновлення моделей. Нечітка логіка водночас забезпечує гнучкість у роботі з невизначеними або неповними даними, що є типовим для екологічних систем моніторингу.

Такий підхід сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень щодо обмеження транспортного руху, планування міської інфраструктури та впровадження заходів із захисту навколишнього середовища. Крім того, система може бути розширена для врахування нових параметрів, таких як тип палива, клас транспортного засобу або специфічні погодні умови.

Інтеграція машинного навчання та нечіткої логіки у екологічні дослідження є потужним інструментом для побудови стійких та адаптивних систем моніторингу. Вона дозволяє не лише оперативно реагувати на зміни у стані довкілля, а й прогнозувати їх у середньостроковій та довгостроковій перспективі.

Результатом такої роботи є підвищення ефективності екологічного управління у містах, зменшення шкідливого впливу автотранспорту на здоров'я населення та сприяння

переходу до сталого розвитку. Використання інтелектуальних систем допомагає здійснювати контроль за якістю повітря навіть у найскладніших умовах густонаселених мегаполісів. Машинне навчання і нечітка логіка разом відкривають нові можливості для розробки гнучких, надійних та високоточних рішень у сфері екологічного моніторингу та прогнозування.

ML.NET дозволяє розробникам C# інтегрувати функції машинного навчання у свої додатки, не вивчаючи нові мови програмування. ML.NET також надає засоби для оптимізації продуктивності моделей машинного навчання, включаючи налаштування гіперпараметрів, вибір та автоматичний вибір моделі.

.NET сумісний з C# та F#, що дозволяє використовувати знайомі мови для розробки моделей машинного навчання. Фреймворк має широкий спектр бібліотек і фреймворків, доступних для машинного навчання, таких як ML.NET і Accord.NET. Ці бібліотеки забезпечують розширені функції, такі як розпізнавання зображення, розпізнавання мовлення та прогнозування часових рядів.

Для розробки моделей системи на основі нечіткої логіки було використано MATLAB. Нечітка логіка дозволяє моделювати логічне рахування, де підтвердження істинності може відрізнятися від 0 до 1. Для кожної зміни потрібно описати термін-множину та функцію функції належності. Для представлення вхідних та вихідних параметрів нечіткої моделі використовують трикутні функції належності. Для опису вихідної змінної визначено терми: "Добрий", "Задовільний", "Шкідливий". Було сформовано набір правил, представлений у вигляді зображень, згідно вимог до опису моделі за допомогою пакету fuzzyTECH (рис.1).

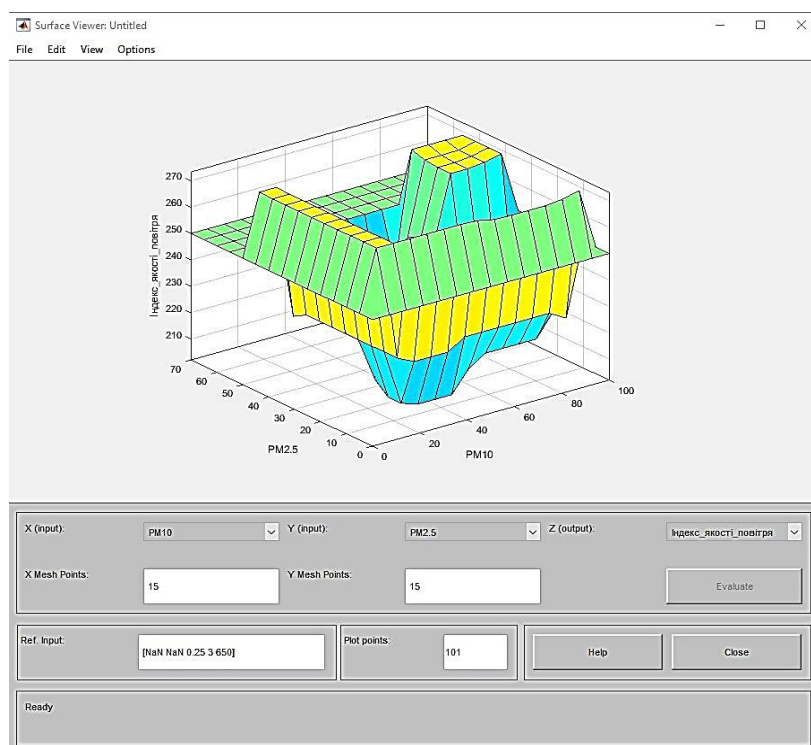


Рис.1. Представлення правил у вигляді зображень

Список сформованих правил (загалом кількість правил вийшла більше 100, адже було багато комбінації, тут лише частина з них):

1. If (PM10 is Добрий) and (PM2.5 is Добрий) and (Озон is Добрий) and (Чадний_газ is Добрий) and (Вуглекислий_газ is Добрий) then (Індекс_якості_повітря is Добрий) (1)

Для інтеграції у програму, було використано технологію ML.NET. Для цього обрано сценарій - визначення певного значення (value prediction). За допомогою цього сценарію обраховувалися числові значення. Також було передбачено можливість вибору сценарію класифікації інформації, в якому дані ділилися на дві категорії і відповідно до кожної пропоставлявся відсоток вірогідності. Інший тип сценаріїв це класифікація фотографій.

Штучний інтелект навчається згідно різноманітних картинок, запам'ятовуючи частини та деталі зображення. Відповідно, якщо завантажити зображення, яке потрібно оцінити, воно буде розділятися на частини та порівнюватися до вже відомих деталей.

Для навчання системи задавалася тривалість процесу навчання. Чим більше часу буде відведено, тим вищою стане точність розрахунків. Оптимальним варіантом обираємо 120 секунд. За цей період штучний інтелект випробує різні варіанти розрахунків і визначить найбільш точний. На цьому етапі автоматично генерується код, який надалі можна інтегрувати у власний проєкт. У результаті отримуємо два класи: перший містить усі поля таблиці, параметри тощо, а другий реалізує метод для обчислення даних (рис.3).

The screenshot displays the ML.NET training interface. On the left, a sidebar lists steps: Scenario, Environment, Data, Train (highlighted), Evaluate, Consume, and Next steps. The main area is titled 'Train' and contains the following information:

- Instruction: 'Specify a time to train for evaluating various models. How long should I train for?'
- 'Training setup summary' dropdown arrow.
- 'Time to train (seconds):' input field with a value of 120.
- 'Train again' button and a green checkmark followed by 'Training complete'.
- 'Training results' section with the following data:
 - Best quality (RSquared): 0,6889
 - Best model: FastForestRegression
 - Training time: 8,82 seconds
 - Models explored (total): 7
 - Generated code-behind: MLModel.consumption.cs, MLModel.training.cs
- 'Next step' button at the bottom.

Рис.3. Навчання системи

Після переходу на веб-ресурс, присвячений моніторингу екологічного впливу автотранспорту на атмосферне повітря, користувачеві відображається початкова сторінка. На ній розміщено інформацію, що описує концепцію та процедуру моніторингу. Функціональність переходу до онлайн-мапи забруднення забезпечується активним елементом інтерфейсу (кнопкою).

Інтерфейс системи забезпечує відображення онлайн-карти, на якій представлені міста з прив'язаними до них координатами (за даними бази даних) та відповідними значеннями показників забруднення. При ініціюванні дії вибору міста (натискання на графічний елемент) користувачеві надається доступ до сторінки, що містить детальну інформацію про рівень забруднення в даній місцевості.

Отже, у роботі було розроблено систему для дослідження впливу викидів в повітря автомобільного транспорту з використанням нечіткої логіки та машинного навчання. Машинне навчання у поєднанні з нечіткою логікою забезпечує новий рівень ефективності в дослідженні впливу шкідливих викидів автотранспорту на довкілля у містах. Завдяки здатності аналізувати великі обсяги даних, працювати з неповною інформацією та робити точні прогнози, інтелектуальна система сприяє оперативному моніторингу стану повітря, виявленню екологічних ризиків і ухваленню обґрунтованих рішень для зменшення

забруднення. Інтеграція сучасних технологій дозволяє підвищити якість екологічного управління та створює підґрунтя для сталого розвитку міського середовища.

1. Pallavi Saxena, Vaishali Naik. Air pollution: sources, impacts and controls. (2019). - Індія: CABI.
2. Сайт SaveEcoBot. [Електронний ресурс]. Отримано з: <https://www.saveecobot.com/radiation-maps> (27.04.2025).
3. Сайт Eco-City. [Електронний ресурс]. Отримано з: <https://theoceancleanup.com/> (27.04.2025).
4. Components of monitoring system. [Електронний ресурс]. Отримано з: https://www.researchgate.net/figure/A-monitoring-system-has-four-main-components-observation-analysis-action-and-storage_fig1_279184218#:~:text=A%20monitoring%20system%20has%20four%2%20main%20components%3A%20observation%2C,events%20and%20triggers%20th%20e%20action%20component%20if%20necessary (27.04.2025).
5. Bertram O'Neal. Air quality monitoring and control strategies. (2017). - USA: Larsen and Keller Education.
6. Vehicle tracker and pollution monitoring system. [Електронний ресурс]. Отримано з: <https://racedynamics.com/vehicle-tracking-and-pollution-monitoring> (27.04.2025).

ЕКОНОМІКО-ЕКОЛОГІЧНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ СПРИЧИНЕНИМИ РОСІЙСЬКОЮ АГРЕСІЄЮ В УКРАЇНІ

Батьковець Наталія
Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна
nataliia.o.batkovets@lpnu.ua

Робота присвячена ризикам, які виникли в екологічних та економічних системах через воєнну агресію та спричинили деформації в господарській сфері країни. Оцінка та управління екологічними ризиками в контексті формування еколого-економічної системи свідчить про розбалансування базових моделей, а в деяких регіонах – ймовірність загрози наслідків, які призводять до граничних кризових ситуацій. Розглянуто фактори та чинники, які вплинули на екологічну безпеку та екологічну дієвість еколого-економічних систем певних регіонів. Доведено пріоритетність вивчення та оцінки екологічних ризиків, визначення їх економічної вартості, а також обґрунтування екологічних заходів з управління еколого-економічною діяльністю підприємства.

Ключові слова: економічний ризик, екологічна система, екологічна безпека, екологічний менеджмент.

The work is devoted to the risks that arose in ecological and economic systems due to military aggression and caused deformations in the economic sphere of the country. The assessment and management of environmental risks in the context of the formation of the ecological and economic system indicates the imbalance of the basic models, and in some regions the possibility of the threat of consequences that lead to extreme crisis situations. Factors and factors that affected the ecological safety and ecological efficiency of the ecological and economic systems of certain regions are considered. The priority of studying and assessing environmental risks, determining their economic value, as well as substantiating environmental measures for managing the ecological and economic activities of the enterprise has been proven.

Key words: economic risk, ecological system, ecological safety, ecological management.

Вступ. Проблема екологічної безпеки є пріоритетним напрямком країн не лише Європи, а реалії сьогодення України поглиблюють складність формування збалансованої еколого-економічної системи. Однією з найпотужніших екологічних проблем в Україні під час воєнної агресії є проблема забруднення повітря, води та ґрунту. Постійні бомбардування та обстріли населених пунктів України призвели до викиду великої кількості токсичних хімічних речовин у навколишнє середовище, а також вплинули на економічну ситуацію в ряді регіонів, через релокації та знищення виробничих підприємств та їх потужностей. Тому актуальним питанням є збереження довкілля в Україні, зокрема проблеми та виклики, які постають сьогодні в контексті триваючої війни. Загальнодержавні стратегічні плани та перспективи майбутньої відбудови територій розглядаються не лише з точки зору відновлення економічного потенціалу областей країни, але і містять бачення щодо відтворення екологічного середовища, природних заповідників та зон. Формування системи ефективного еколого-економічного управління покликане заблокувати надмірне екологічне навантаження на суспільство та мінімізувати ризики екологічної та економічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика формування еколого-економічної системи, оцінки екологічних ризиків та здійснення еколого-економічного управління в контексті економічного розвитку підприємств перебуває у центрі уваги як українських, так і закордонних науковців таких як: В. Дарова, О. Мельника, О. Кузьменка, З. Морохова, М. Лемешева, І. Грабинського, С. Ілляшенко, А. Черепанова та інші. У вітчизняній економічній літературі не сформовано єдиного підходу до формування ефективної еколого-економічної системи регіонів та областей, особливо ти, які знаходяться у тимчасовій окупації.

Метою статті є дослідження та систематизація концептуальних засад оцінки та управління еколого-економічними ризиками в контексті створення відновлювальної еколого-економічної системи регіонів, в яких загроза та ймовірність настання події катастрофічного ризику доведена.

Повномасштабне вторгнення росії до України продовжує завдавати величезної шкоди інфраструктурі населених пунктів, де тривають бойові дії.

На сьогоднішній день неможливо точно оцінити вплив війни на економічні та екологічні системи через брак релевантної інформації. Адже зміни в еколого-економічних системах відбуваються щоденно, несучи за собою їх динамічне руйнування.

Зрозуміло, що основних два чинники: час тривалості бойових дій та дії окупаційної адміністрації є невідконтрольними для нашої країни, а відтак велика кількість складових еколого-економічної системи не можлива для оцінювання та аналізу.

Еколого-економічна система має дві складові: екологічну та економічну. Економічна система в процесі свого функціонування використовує природні ресурси, відходи виробництва та споживання створюючи при цьому для суспільства необхідні блага. Тому ці дві підсистеми не можуть бути взаємозамінними, а лише доповнюючими.

«Еколого-економічна система» – це екологоконструктивна діяльність суб'єктів господарювання, що забезпечує спрямованість і рівень соціально-економічного розвитку суспільства та сприяє якості внутрішніх еволюційних перетворень у процесі безперервних змін в еколого-економічній рівновазі [9].

Відтак, можна зробити висновок про те, що еколого-економічна система покликана забезпечувати збалансоване та раціональне використання природно-ресурсного потенціалу регіону, пропорційний розвиток екосистем у процесі підприємницької діяльності, яка повинна забезпечувати стабільний економічний розвиток та життєдіяльність соціуму. Як видно із визначення, на даний час жодний постулат не має реального втілення, що власне і спричинило появу ряду чинників, які суміжні з ризиками.

На сьогоднішній день в інформаційних джерелах є досить велика кількість визначень щодо дефініції «екологічний ризик» та «економічний ризик».

Визначення дефініції економічного та екологічного ризиків

Автор	Визначення
«екологічний ризик»	
Чуприна Ю.Ю.	Екологічний ризик - це оцінка на всіх рівнях ймовірності появи в навколишньому природному середовищі негативних змін, спричинених антропогенним впливом.
Корнято В.О.	Під екологічними ризиком розуміють імовірну небезпеку завдання шкоди природному середовищу у вигляді можливих втрат за певний час.
Войціцький В.М.	Екологічні ризики – виділені в окрему групу ризики (природні, антропогенні тощо), які пов’язані із забрудненням довкілля від різноманітних джерел, що загрожують стану біоти, в тому числі здоров’ю і життю людей
Бредун В.І.	Екологічні ризики включають ризики хімічного забруднення навколишнього середовища шкідливими й токсичними речовинами, ризики руйнування біоти, ризики перенаселення, опустелювання, вирубки лісів, виснаження природних, питних та продовольчих ресурсів.
«економічний ризик»	
Г. Вербицька	економічний ризик розглядає як можливість зазнати не лише втрат, а й отримати додаткові вигоди для господарюючого суб’єкта.
Донець Л.І.	Під економічним ризиком розуміють такий вид ризику, який виникає при будь яких видах підприємницької діяльності, спрямованих на одержання прибутку і пов’язаних з виробництвом продукції, реалізацією товарів, наданням послуг, виконанням робіт; товарно-грошовими і фінансовими операціями; комерцією, а також реалізацією науково-технічних проектів
Бриндзя О.З.	Економічний ризик представляє собою об’єктивно-суб’єктивну категорію. З визначення поняття управління ризиком та його природи випливає, що основною метою менеджменту ризику є оптимізація роботи за критерієм раціоналізації ризиків. При цьому, раціоналізація ризику – це не обов’язково його мінімізація, а обґрунтування такого його рівня, що забезпечував би не лише максимальну очікувану ймовірність досягнення мети діяльності в конкретних умовах, але і сприяв би зміцненню та росту ефективності діяльності підприємства через виконання своїх позитивних функцій.
Вітлінський В.В.	«економічний ризик – об'єктивно-суб'єктивна категорія в діяльності суб'єктів господарювання, яка пов'язана з переборюванням невизначеності та конфліктності в ситуації неминучого вибору і відображає ступінь відхилення від цілей, бажаного результату у несприятливий бік, ступінь збитків, невдач з урахуванням впливу керованих та некерованих факторів, прямих та зворотних зв'язків

Всі сучасні визначення ризиків супроводжуються поняттям «невизначеність», яке, на жаль, має місце в кожному процесі, який властивий еколого-економічній системі. Власне невизначеність як суб’єктивна категорія призводить до унеможливлення точної діагностики та оцінювання ризиків, як економічних, так і екологічних. Відповідно, діагностика будь яких

ризиків, а особливо у воєнний час, приймає імітаційні характеристики, ймовірність настання ризику у відповідності до яких оцінюється наближеними показниками.

На жаль, сьогодні видозмінилися всі фактори, які спричиняють настання події економічного чи екологічного ризику. Детермінанта появи та оцінки факторів ризику досить складна для аналізу.

За даними офіційного ресурсу Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України Екозагроза, заподіяні втрати та нанесену шкоду не можна порівняти навіть зі шкодою, завданою під час Другої Світової Війни.

Основні негативні тенденції які спричиняють настання події економічного ризику характеризують наступні чинники:

Перевезення бізнесу: зміна локації стратегічно важливих підприємств в безпечні райони України, а також підприємств-виробників товарів першої необхідності. За період війни, за даними мінекономіки України, релокувалися 800 підприємств [11].

Відсутність комунікацій виробників із споживачами – наразі цей процес відновлюється, однак більшість акцентів ставиться на соціальну відповідальність та патріотизм, що є важливо для українського споживача;

Втрачена логістика потребує серйозного реформатування вантажоперевезень що визначається втратою великих площ складських приміщень, неможливістю формувати великі обсяги товарних мас, збоєм перевезень через комендантську годину та постійними атаками;

Втрата місця працевлаштування, зменшення матеріальних виплат та фінансової стабільності населення – згідно даних міністерства економіки близько 5 млн. осіб втратили роботу через воєнні дії, велика кількість підприємств були змушені скоротити працівників або відправили їх у неоплачувані відпустки. Більше 7 млн осіб опинилися за межею бідності, а рівень бідності сягнув 24% населення [2].

Географічне розбалансування споживчого ринку, особливо відчувається через втрати галузевих підприємств на тимчасово окупованих територіях, територіях на яких проводяться активні воєнні дії та звільнених територіях.

Із зрозумілих причин, основний регіон релокації підприємств є Західний.

Основним географічним напрямом релокації є західні області України. На рис. 1 наведено структуру релокованих підприємств у розрізі областей станом на березень 2023 року. Варто зауважити, що станом на 2024 рік, частка успішно релокованих підприємств стабільно зростає. Також варто зважити на тип релокації, оскільки великі підприємства, як правило реалізують лише часткову релокацію, адже вони повністю залежать від сировинної бази та технічно складного обладнання.

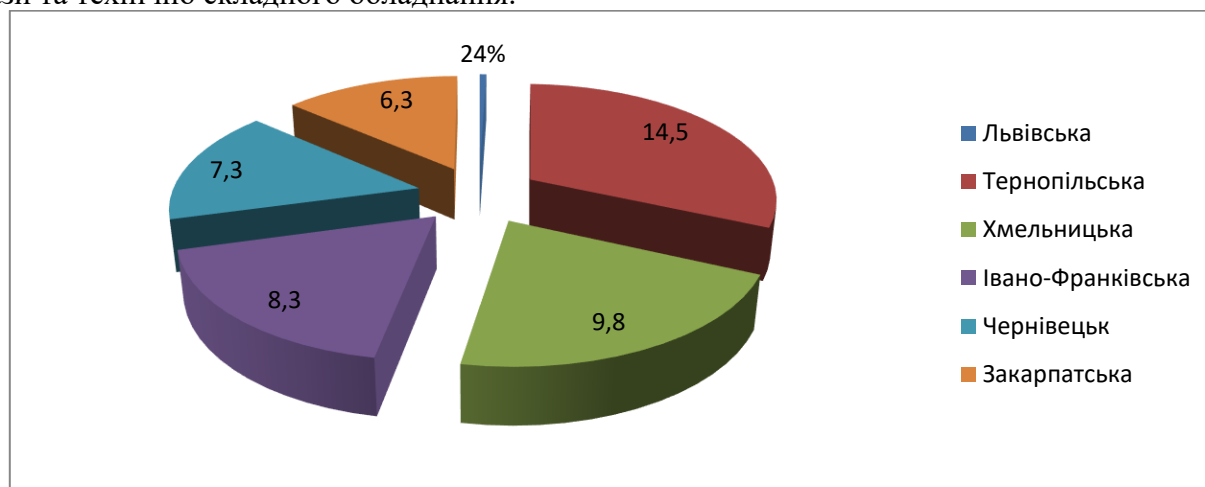


Рис. 1. Структуру релокованих підприємств у розрізі областей станом на березень 2023 року [7]

Демографічні виклики також мають місце при визначенні факторів економічного ризику. Брак робочої сили викликаний чинниками:

- Мобілізація - призов військовозобов'язаних на службу в діючу армію у зв'язку із запровадженням воєнного стану;
- Скорочення штату працівників у зв'язку із службою у Збройних силах України;
- Виїзд за кордон, міграція працездатного населення.

За даними Національного банку України через скорочення штату працівників у зв'язку із службою у Збройних силах України у 2023 році 44% підприємств мали брак кадрів.

Згідно з опитуваннями Національного банку України, і а 24% – через виїзд за кордон [6].

Логістика завжди були важливою складовою економіки, ключовим фактором успіху функціонування підприємств, збереження робочих місць і надходження валютної виручки до країни, а в умовах війни її значення лише зросло.

Логістика в Україні також набула змін, адже економічний ризик торкнувся і цієї сфери життєздатності підприємств. Послуги логістичних та експедиторських компаній не могли надаватися у звичному режимі, про що свідчить показник припинення діяльності цих підприємств. Лише за перший рік війни близько 30% логістичних та експедиторських компаній припинили свою діяльність. Нажаль, обставини які спричинили настання події економічного ризику, також неконтрольовані та не можуть бути прогнозованими:

- Тимчасово окуповані території;
- Зруйнована інфраструктура та знищення населених пунктів;
- Значні перебої з паливом;
- Ризики, які виникають з безпекою при наданні логістичних послуг;
- Ризики, які виникають з безпекою та збереженістю вантажів;
- Порушення логістичних ланцюгів;
- Призупинення морських перевезень через блокування Одеських портів, а відтак додаткові економічні ризики, які стосуються українського експорту;
- Ризик безперервності логістичних поставок; можливість забезпечення безперервності поставок відновилося завдяки відкриттю Транскаспійського маршруту;
- Знищення великих територій складських приміщень, що змушує знаходити додаткові площі та територіальне розміщення товарів для зберігання.

За даними анонсованими Work.ua у 2023 році логістична сфера повільно відновлюється, стає зрозуміло, адже у галузі збільшується кількість пропозицій роботи. Динаміка спостерігається позитивна [5].

Ще одним чинником, який формує складові економічного ризику є ріст цін та зниження власного виробництва товарів, в тому числі і сільськогосподарської продукції. Бойові дії в низці регіонів та загальне падіння доходів українців зумовили просідання споживчого ринку. Аналітичний центр CASE Україна декларує ріст цін на 44%.

Таблиця 2

Ріст цін в період війни з січня 2022 року по жовтень 2024 року

Продукти харчування	+50,8%
Тютюнові вироби	+62,5%
Алкогольні напої	+33,1%
Водопостачання	+12,9%
Електроенергія	+177,6%
Побутова техніка	+30,1%
Ліки та медичні товари	+45,4%

[Джерело: Державна служба статистики України 3]

Основними пріоритетами споживчого ринку сьогодення визначено:

- 62% споживачів звертають увагу на торгову марку, країну походження товару;
- Збільшилася кількість споживачів, які віддають перевагу українським брендам – 74%;

Формується раціональний попит, який ґрунтується на планомірних покупках та не спонтанному задоволенні потреб, рішення про здійснення покупки приймається заздалегідь 73% [1].

Щодо екологічних ризиків у загальній системі управління ризиками, то варто зазначити, що вони мають не меншу долю вагомості ніж економічні.

До основних екологічних ризиків можна віднести:

- Незасіяні поля;
- Питна вода, знищення та підриг водосховищ (Каховське, Оскільське водосховище);
- Заміновані території;
- Забруднене повітря;
- Знищення природних заповідників;
- Розбалансування біологічних систем;
- Знищене відновлення фауни та флори;
- Руйнівний вплив на ландшафт . За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів, за попередніми підрахунками, станом на 1 березня 2022 року агресор веде бойові дії на території 900 об'єктів природно-заповідного фонду площею 12406,6 кв.км, що становить близько третини площі природно-заповідного фонду України;
- Втрата біорізноманіття та загроза червонокнижним видам;
- Пожежі в екосистемах через бойові дії та на промислових об'єктах та об'єктах критичної інфраструктури;
- Хімічне забруднення від обстрілів і ракет;
- Забруднення ґрунтів та моря нафтопродуктами;
- Зруйновані очисні споруди Маріуполя, Бердянська та інших малих міст акваторії Азовського моря;

На рис. 2 зображені природні території знищені внаслідок військового вторгнення.

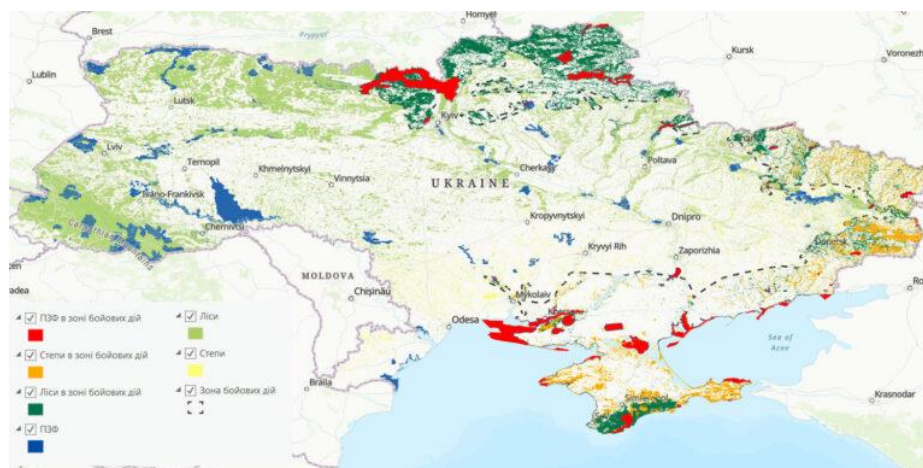


Рис 2. Знищені природні території, внаслідок військового вторгнення за даними ГО “Українська природоохоронна група” [4]

Узагальнюючи викладений матеріал, можна констатувати факт, про те, що Україна залишається ризикованою зоною, наслідки війни вже призвели до настання катастрофічних ризиків. Навіть якщо взяти умовну репарацію від росії, цієї суми буде недостатньо для

повного відтворення еколого-економічної системи. Основними викликами можуть стати: інвестиції, екологічна безпека, демографія, відновлення економіки міст, брак робочої сили.

1 Бренди під пильним поглядом URL:<https://gradus.app/uk/open-reports/consumer-trends-ukrainians-third-year-great-war-saving-money-becoming-more-picky-about-brands/> (дата звернення: 20.01.2025)

2. Ведення бізнесу після 15 місяців повномасштабної війни в Україні: Опитування Американської торговельної палати в Україні та ЕУ Україна. URL: <https://chamber.ua/ua/news/rezultaty-opytuvanniapalaty-ta-ey-vedennia-biznesu-pislia-15-misiatsivpovnomasshtabnoi-viynu-v-ukraini/> (дата звернення: 05.02.2025)

3 Державна служба статистики України URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 03.02.2025)

4 Знищені природні території, внаслідок військового вторгнення за даними ГО “Українська природоохоронна група” URL: https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA4-y8BhC3ARIsAHmjC_H8POQSSG9aF4jcpbMNgb9GzgUX0cWDOpg424CY7VkNWSEC6yG-f7waAkuMEALw_wcB (дата звернення: 23.01.2025)

5 Логістика в період війни: виклики та рішення URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/logistyka-v-period-vijny-vyklyky-ta-rishennya> (дата звернення: 23.01.2025) (дата звернення: 03.02.2025)

6 Інфляційний звіт. Липень 2024 року. Національний банк URL:України <https://bank.gov.ua/> (дата звернення: 05.02.2025)

7 Мангушев Д.В. Релокація бізнесу в умовах війни економіка та управління підприємствами - Випуск №75. -2023 -С. 19-124 URL: http://www.market-infr.od.ua/journals/2023/75_2023/23.pdf

8. Програма релокації підприємств Міністерства економіки України. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=3e766cf9-f3ca4121-8679-e4853640a99a&title=ProgramaRelokatsiiPidprimstv> (дата звернення: 05.02.2025)

9 Розум Р. І., Буряк М. В. Любезна І. В. Еколого-економічні системи: основні аспекти URL:<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/10273/1/Ekologo-ekonom-system.pdf> (дата звернення: 05.02.2025).

10. Оцінка впливу війни. Аналітичне дослідження. URL: https://ukraine.iom.int/sites/g/files/tmzbd11861/files/sme_doslidzhennya_presentation.pdf (дата звернення: 05.02.2025)

11. Сошников А.О., Єршова Ю.О., Юдін Ю.О. Релокація суб’єктів господарювання в умовах воєнного стану. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: юридичні науки. 2022. Т. 33. № 4. С. 24–30.

DESIGNING AN AIR QUALITY MONITORING SYSTEM IN SHELTERS BASED ON IOT TECHNOLOGIES AND THE HOME ASSISTANT SOFTWARE ENVIRONMENT

Bernatska Nataliia¹, Typilo Iryna¹, Bernatsky Orest²

¹ Lviv Polytechnic National University

² Separate Structural Unit "Technical and Economic Vocational College of Lviv Polytechnic National University

Lviv, Ukraine

nataliia.l.bernatska@lpnu.ua

Abstract.

In times of war, the issue of environmental safety is of particular relevance, in particular in terms of ensuring a healthy environment in protective structures (shelters). The air quality in

confined spaces can deteriorate rapidly without proper control, which poses a risk to people who stay in shelters for a long time. The answer to this challenge was the development of an affordable air quality monitoring system based on Internet of Things (IoT) technology using Home Assistant software, SmartAir sensors, Sonoff smart sockets, and MiniUPS autonomous power supplies.

Keywords: air quality, shelters, IoT, Home Assistant, SmartAir, Sonoff, MiniUPS

Introduction

Given the current challenges associated with man-made and natural disasters, as well as military operations, creating safe conditions for the population in shelters is of paramount importance. One of the key aspects of this safety is air quality, which directly affects the health and well-being of people in confined spaces.

Traditional methods of air quality monitoring are often ineffective, especially when resources are limited and a rapid response is required. Therefore, it is important to develop and implement new, more efficient monitoring systems based on modern technologies. IoT-based environmental monitoring technologies allow for continuous monitoring of air parameters, prompt response to deviations from standard values, and automation of measures to improve the microclimate. The Home Assistant software package integrates a wide range of sensors into a single monitoring system, allowing for real-time data reading, visualisation in a convenient format, and the setting up of automated control scenarios for ventilation, air purifiers and warning systems.

Literature review

During war and emergencies, when people are forced to stay in shelters for long periods of time, air quality monitoring becomes extremely important.

There are several methods for monitoring air quality in shelters [1]:

- portable monitors: these devices are small and handy and can be used to measure pollution levels at different points in the shelter.
- Fixed monitors: these systems are installed in the shelter and provide continuous air quality data.
- Gas analysers: These devices are used to measure levels of specific gases such as CO₂ or CO.

It is important that the monitoring method used is appropriate to the needs and size of the shelter. It is also important that the monitoring data are regularly analysed and that measures are taken to improve air quality if necessary [2, 3].

Creating an effective system for monitoring air quality in shelters is an important task in ensuring the safety and comfort of people who are forced to stay in confined spaces for long periods of time. The use of IoT technologies makes it possible to create an autonomous monitoring system that can record the level of key indicators such as carbon dioxide (CO₂), volatile organic compounds, fine dust (PM_{2.5}, PM₁₀), temperature and humidity in real time [4].

Benefits of using IoT to monitor air quality in shelters [5, 6]:

- Accurate, real-time data: IoT sensors can continuously collect air quality data, giving users a clear picture of their environment.
- Remote access: users can access air quality data using smartphones, tablets or computers.
- Alerts and warnings: IoT sensors can send alerts when pollution levels exceed safe limits, allowing users to take action to improve air quality.
- Automation capability: IoT systems can be integrated with other devices, such as ventilation systems, to automatically adjust air quality.

Examples of how IoT can be used to monitor air quality in shelters [7, 8]:

1. CO₂ monitoring: CO₂ levels in a shelter can rise rapidly if people stay in it for long periods of time. IoT sensors can monitor the CO₂ level and send alerts when it becomes dangerous;
2. Gas leak detection: A gas leak, such as CO or propane, can be deadly in a confined space. IoT-based gas detectors can quickly detect the danger and alert people to take safety measures.
3. Temperature and humidity control: Too high or too low temperature, as well as high humidity, can cause discomfort and affect people's well-being. IoT sensors can monitor these parameters and automatically adjust ventilation, heating, and cooling.

Overall, the use of IoT for monitoring air quality in shelters can be a powerful tool for protecting human life and health during war and emergencies [9, 10]. By providing accurate, real-time data and the ability to automate, IoT systems can help create a safer and more comfortable environment for people forced to stay in shelters [7, 11, 12].

The Home Assistant software package provides extensive capabilities for integrating sensors, processing data, and implementing automatic response scenarios. It allows you to create an intuitive user interface, set up notifications, and control ventilation systems or other devices that improve air quality.

A list of key features of the Home Assistant software package [13-15]:

- Local control and privacy: The measuring devices communicate directly with Home Assistant, storing data on your own network. This guarantees privacy and avoids dependence on cloud services.
- Compatibility with a variety of devices: The Home Assistant software package is compatible with a wide range of detectors from over 1,500 brands. In particular:
 - PM2.5 sensors, which measure the level of fine particulate matter that can adversely affect the health of the respiratory system;
 - CO₂ sensors: carbon dioxide can accumulate indoors, leading to fatigue, headaches and other problems;
 - VOC detectors: Volatile organic compounds are chemicals that can be released from furniture, paint, cleaning products and other products.
 - Temperature and humidity sensors: These sensors can help you create a more comfortable indoor environment.
- Home Assistant integrates with various protocols such as Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, and others, allowing you to control lights, thermostats, cameras, sensors, and many other devices.
- The Home Assistant software package allows you to create your own automated scenarios according to your needs. Thanks to its open source code, Home Assistant offers a high degree of flexibility and customisation. An active community of developers is constantly adding new features and integrations, improving the functionality for monitoring systems.
- Home Assistant offers a variety of ways to visualise your air quality data. You can use graphs, charts, and dashboards to track pollutant levels in real time.
- Home Assistant can send notifications when air pollution levels exceed safe limits. This can help you take action to improve your indoor air quality.
- Offering a powerful set of features, the Home Assistant software package provides ease of use with a clear web interface for easy management and configuration, as well as a mobile app for remote control. However, despite its ease of use, setting up Home Assistant may require additional technical knowledge.

Overall, Home Assistant is a powerful and versatile option for automating a monitoring system. It provides wide device compatibility and extensive customisation options.

Results discussion

The architecture of our proposed system for monitoring air quality in shelters includes three main levels:

1. Data collection level - IoT sensors that measure air quality parameters (CO₂, PM2.5, PM10, temperature, humidity, volatile organic compounds, oxygen level).
2. Data processing and storage level - a central computing node (local server or cloud environment) that aggregates and analyses the information received.
3. User interaction level - the Home Assistant dashboard that visualises data and provides control over the alert and automation system.

The main purpose of the system (Fig. 1) is to provide automated monitoring of air environment parameters, prompt detection of critical concentrations of CO₂, PM2.5, VOC, CO and automation of measures to optimise the conditions of stay in the protective structure.



Fig. 1. Prototype of the air quality monitoring system in shelters based on the Internet of Things technology and the Home Assistant software package

Our proposed air quality monitoring system using the Internet of Things technology and the Home Assistant software package consists of:

✓ Home Assistant server:

- The central hub that connects all other components;
- Interface: provides a web-based interface for managing the system and setting up automation;
- System core: processes data from sensors, controls devices, and performs automation.

✓ Smart Air sensors are intelligent devices for remote monitoring of the air environment. They provide accurate data on air pollution levels, temperature, humidity, and other important parameters.

✓ Sonoff smart socket devices: the devices perform actions based on data received from sensors or on user commands, such as switching on or off LED bulbs, sockets, fans, and air conditioners.

✓ Zigbee gateway: enables communication between different devices such as temperature sensors, lamps and switches. This gateway collects data from the sensors, processes it, and transmits it to a server or the cloud via a Wi-Fi network. Its role is critical to ensure uninterrupted communication between system components.

✓ Mini UPS devices that provide uninterrupted power to the sensors and the IA server. They keep sensors and the gateway running smoothly in the event of a power outage, which is essential to ensure stable air quality data collection even in unstable power conditions.

✓ User interface (Fig. 2):

- The main interface for configuring the system and viewing data;
- mobile application: an additional interface for convenient control from a mobile device;
- panels: visualisation of data from sensors and device status.

✓ Scenarios: complex automations: scenarios allow you to combine several automations into one sequence of actions;

✓ Integrations: expanding functionality: Home Assistant can integrate with other systems and services, such as Google Calendar, MQTT, and more.

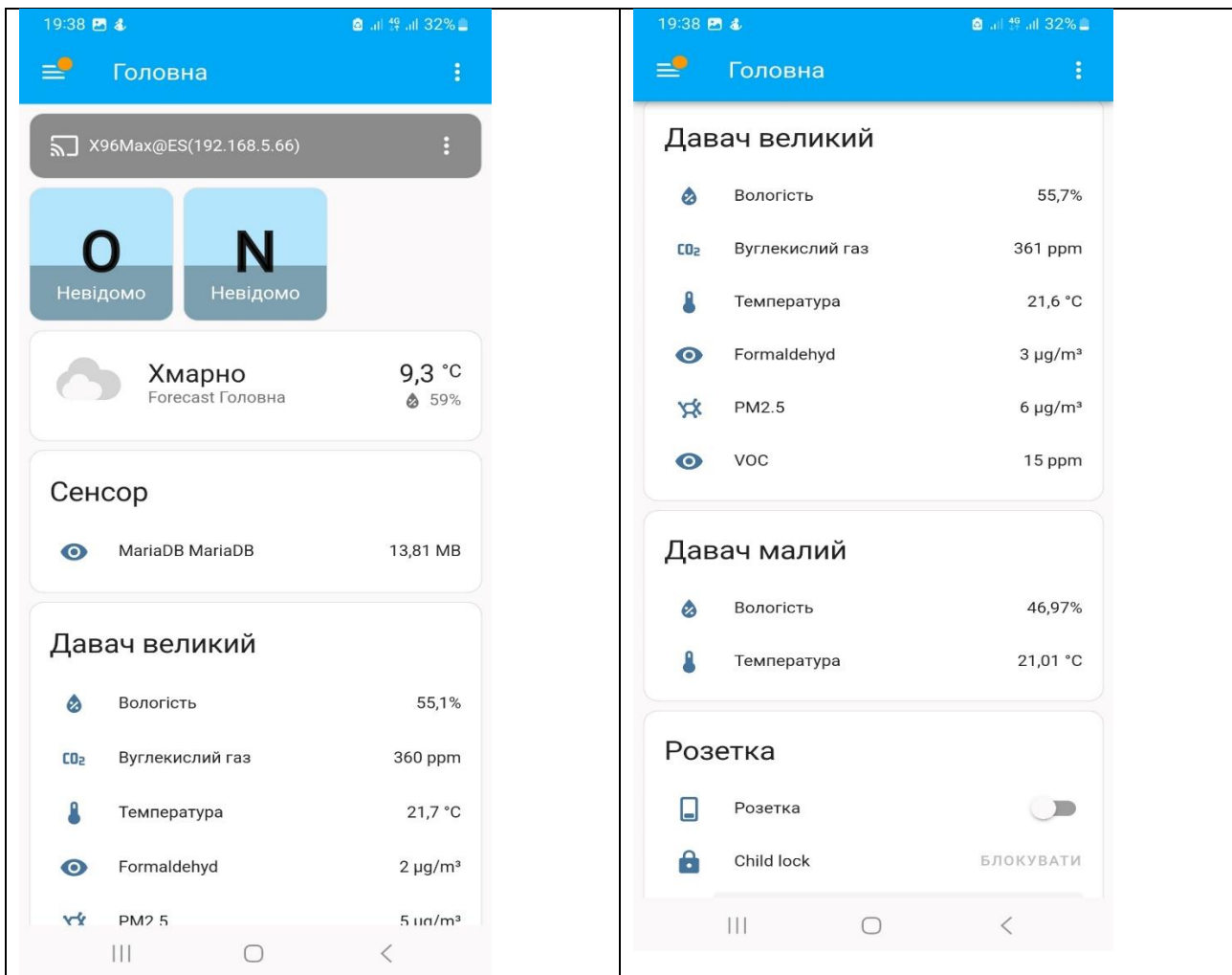


Fig. 2. Screenshots of the mobile application of the indoor air quality monitoring system using a sensor to measure air quality in terms of humidity, carbon dioxide concentration, temperature, formaldehyde concentration, particulate matter and volatile organic compounds

Main tasks of the system:

- Continuous monitoring of air environment parameters (CO₂, PM2.5, temperature, humidity, VOC, CO).
- Automation of life support systems (activation of ventilation, air filtration, emergency alerts).
- Remote access to data (via web interface or mobile application).
- Autonomous operation (local data processing without dependence on cloud services).
- Power consumption optimisation (energy-efficient device operation modes).

How the system works:

- Data collection: sensors installed in the shelter constantly collect information about temperature, humidity, CO₂ level, total volatility of organic compounds and other parameters that characterise air quality.
- Data processing: the received data is sent to the Home Assistant server, where it is processed and analysed.
- Automation: based on the data received, the system can automatically trigger various actions, such as switching on the ventilation, turning on the lights, or sending notifications to the user.

- Visualisation: air quality data can be visualised in the form of graphs, charts, or other convenient formats (Fig. 2).

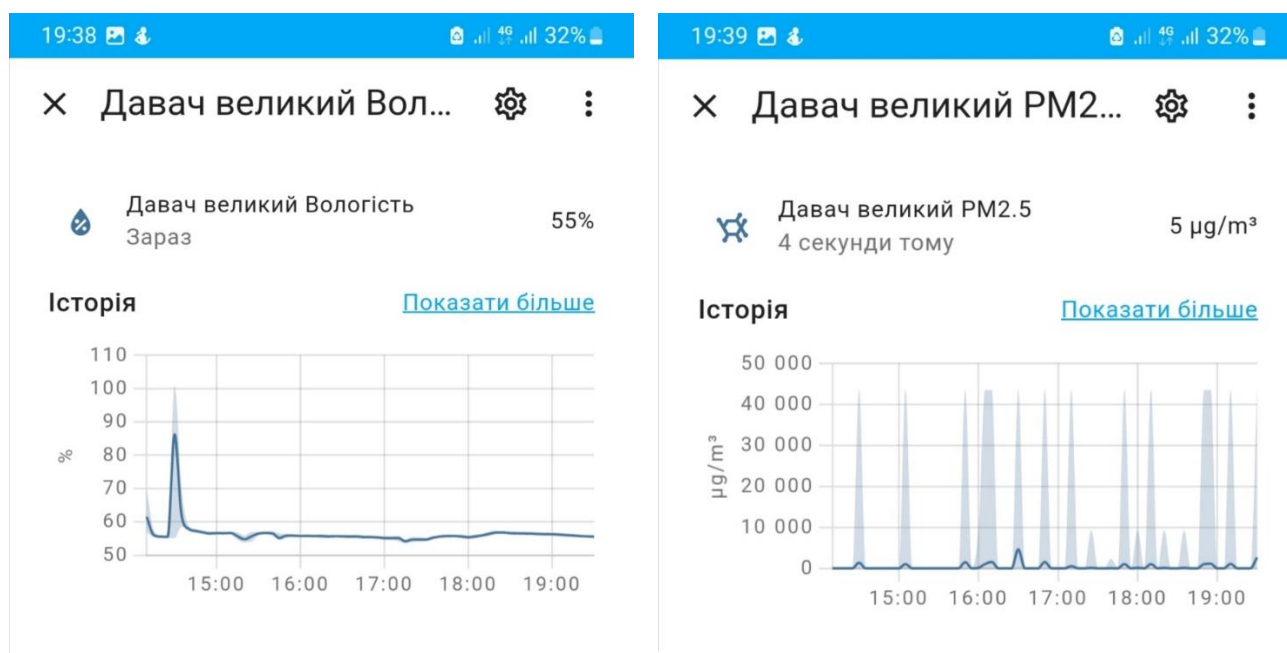


Figure 3. Visualisation of air quality data in a shelter

The developed air monitoring system for shelters based on IoT and Home Assistant provides:

- ✓ Continuous air quality monitoring (CO₂, PM2.5, temperature, humidity, VOC, CO).
- ✓ Automation (switching on ventilation, air purifiers, alarms).
- Remote access (via web interface or mobile application).
- Offline mode (local operation without dependence on cloud services).
- ✓ Energy saving (optimisation of device operation).

The proposed system has shown high efficiency of air monitoring in the shelter, stable communication and correct operation of automation. The measurement accuracy meets expectations, although additional sensor calibration is possible. The system has a battery life of 4-5 hours, which is sufficient for short power outages. Due to its modular structure and the use of open technologies, the system can be scaled up to be used not only in shelters but also in public buildings, hospitals, educational institutions and industrial facilities, which significantly increases the level of public safety in emergency situations.

1. Montaser, N.A. (2024). Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment [Ecotoxicology and Environmental Safety]. Volume 283, 15.
2. Munera, D. (2021). IoT-based air quality monitoring systems for smart cities: A systematic mapping study [International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)]. Vol. 11, No. 4, 3470-3482.
3. Shahid S, Brown DJ, Wright P, Khasawneh AM, Taylor B, Kaiwartya O. Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research. [Sensors]. 2025; 25(7). <https://doi.org/10.3390/s25072070>.
4. Malleswari, T. Mohana, K (2022). Air pollution monitoring system using IoT devices: Review [Material Today]. Volume 51, 1147-1150.

5. Susmitha, M. N. (2023). A Survey on Air Pollution Monitoring System using IOT and Data Analytics [International Journal of Research Publication and Reviews]. Vol 4, no 3, 4401-4404.
6. Dai X, Shang W, Liu J, Xue M, Wang C. (2023). Achieving better indoor air quality with IoT systems for future buildings: Opportunities and challenges. Sci Total Environ. 2023;895:164858. doi:10.1016/j.
7. Shashank, G. (2022). IoT Based Air Quality Monitoring System [Technoarete Transactions on Internet of Things and Cloud Computing Research]. Vol-2, 1-6.
8. Tan H, Othman MHD, Kek HY, et al. (2024). Revolutionizing indoor air quality monitoring through IoT innovations: a comprehensive systematic review and bibliometric analysis. [Environ Sci Pollut Res Int.]. 31(32), 44463-44488. doi:10.1007/s11356-024-34075-2.
9. García L, Garcia-Sanchez AJ, Asorey-Cacheda R, Garcia-Haro J, Zúñiga-Cañón CL. Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments. [Sensors]. doi:10.3390/s22239221.
10. Hura, V., Monastyrskii, L. (2023). IoT-based Solution for Detection of Air Quality using ESP32 [Artificial Intelligence]. 3.
11. Jo JH, Jo B, Kim JH, Choi I. (2020). Implementation of IoT-Based Air Quality Monitoring System for Investigating Particulate Matter (PM10) in Subway Tunnels. [International Journal of Environmental Research and Public Health]. 17(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph17155429>.
12. Karthikeyan, S. (2024). Iot based air quality index monitoring system using ESP32 [Internation Research Journal of Education and Technology]. Volume: 06, 70-75.
13. Kulykovska, N. (2024). Automated Internet of Things system for monitoring indoor air quality4th Edge [Computing Workshop]. April 5, Zhytomyr, Ukraine, 97-104.
14. Alnowaiser, K. (2024). IoT based smart framework to predict air quality in congested traffic areas using SV-CNN ensemble and KNN imputation model [Computers and Electrical Engineering]. Volume 118.
15. Kumar R. (2025). Air Quality Prediction using IoT and Neural Network - an Empirical Analysis [Journal of Theoretical and Applied Information Technology]. 1076-1082.

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТУ АМОНІЮ

*Белянська Олександра
Кам'янське вище професійне училище
м.Кам'янське, Україна
Маковецький Дмитро, Красніков Кирило
Дніпровський державний технічний університет
м.Кам'янське, Україна
belyans@ukr.net*

This study investigates the influence of technological parameters on the production of ammonium sulfate at PJSC "YUZHKOKS" using information technologies, specifically the Academic Laboratory virtual lab. Based on practical data from the operation of the ammonium sulfate production unit using coke oven gas (volume of coke oven gas, m³/h; gas pressure, mm H₂O; saturator resistance, mm H₂O; solution temperature, °C; gas temperature, °C; acidity of the mother

liquor, pH; saturation of the mother liquor, %; sulfuric acid content in the ammonium sulfate in the stack, %; water content in the ammonium sulfate in the stack, %), a multifactor mathematical model was developed. The coefficient of determination for the resulting mathematical model is $R^2 = 0.92$. It was found that the practically determined product yield, according to the mathematical model, is 15% higher than the theoretical yield.

Keywords: Virtual laboratory, technology, mathematical model, ammonium sulfate.

В роботі було проведено дослідження впливу технологічних параметрів на виробництво сульфату амонію ПРАТ «ЮЖКОКС» при використанні інформаційних технологій, а саме віртуальної лабораторії Academic Laboratory. На основі отриманих практичних даних роботи установки отримання сульфату амонію з коксового газу (кількість коксового газу, м³/год; тиск газу, мм вод. ст.; опір сатуратора, мм вод. ст.; температура розчину, °C; температура газу, °C; кислотність маточного розчину, pH; насиченість маточного розчину, %; сульфатна кислота у сульфаті амонію в штабелі, %; вода у сульфаті амонію в штабелі, %) побудували багатофакторну математичну модель Коефіцієнт детермінації отриманої математичної моделі $R^2 = 0,92$. Встановлено, що практично визначений вихід продукту згідно математичної моделі є вищим за теоретичний на 15 %.

Ключові слова: Віртуальна лабораторія, технологія, математична модель, сульфат амонію.

Низьковуглецева економіка стимулює розвиток чистої енергетики, що підвищить попит на метали [1]. Промислові відходи містять цінні метали, але їх складність та неправильна утилізація забруднюють довкілля. Для сталого розвитку необхідні чисті, ефективні, економічні та стійкі технології вилучення цінних металів з мінералів (особливо бідних руд і відвалів) та промислових відходів [1]. Коксовий газ, побічний відход виробництва у технології отримання коксу із кам'яного вугілля. Очищення коксового газу – поширений спосіб отримання сульфату амонію. Цей процес обробляє сирий газ, видаляючи домішки й одночасно вилучаючи цінні хімічні продукти, і є частиною коксування. На виробництві цю систему називають системою вилучення хімічних продуктів коксування. Сирий парогазовий продукт карбонізації коксівного вугілля потребує очищення перед використанням. Очищений коксовий газ (водень, метан, оксид вуглецю) є паливом для металургії та інших галузей. Глибоке очищення видаляє залишки домішок (нафталін, сірководень) і вологу, роблячи газ придатним для міського використання або хімічного синтезу [2].

Німецькі коксові заводи мають найвищі екологічні стандарти, але дослідження з покращення ефективності та екологічності тривають у всьому світі [3]. Відновлення аміаку з коксового газу є важливим економічно та екологічно. Його видалення з газу та промивних вод є загальною вимогою, оскільки аміак спричиняє корозію сталі, а його окислення утворює шкідливі оксиди азоту (NO_x), що забруднюють ґрунт і воду [3].

Китайські науковці оптимізували вилучення хімічних продуктів коксування. Виробничі процеси на коксохімічних заводах різняться залежно від масштабу, ринку, бюджету тощо. Окрім основних цехів, деякі заводи мають установки для рафінації бензолу, переробки коксового газу в ЗПГ, глибокої переробки смоли та виробництва електроенергії для розширення виробництва [4].

Європейський Союз опублікував різні документи щодо норм і найкращих доступних технологій [5]. Ці документи є прикладом для багатьох інших країн по всьому світу. Якщо діючі підприємства не в змозі відповідати новим екологічним стандартам або продуктивність їх знижується, то підготовка дослідження для вирішення цих проблем завжди має бути першим кроком до вирішення цього питання.

Метою нашої роботи є дослідження оптимізації роботи установки отримання сульфату амонію цеху уловлення побічних продуктів коксування у ПРАТ «ЮЖКОКС» м. Кам'янське в Україні із використанням інформаційних технологій. На підприємстві в

умовах війни виникають час від часу проблеми із забезпеченням вихідною сировиною (кам'яного вугілля) установки і відповідно це впливає на сам процес отримання сульфату амонію. Тому, темою роботи було саме дослідження щодо оптимізації роботи відділення уловлення аміаку установки сульфату амонію з метою підвищення якості екологічного очищення коксового газу до необхідного рівня. Актуальним є створення математичної багатофакторної моделі, яка була б виконана на основі промислових реальних даних роботи установки сульфату амонію і допомогла б спрогнозувати залежність вихідних технологічних параметрів на якість і кількість отриманого добрива.

Використовуючи віртуальну онлайн лабораторію (<https://academlab.web.app/>) оброблено отримані реальні промислові параметри роботи установки сульфату амонію. Головний вид сторінки віртуальної лабораторії Academic Laboratory наведено на рисунку 1.

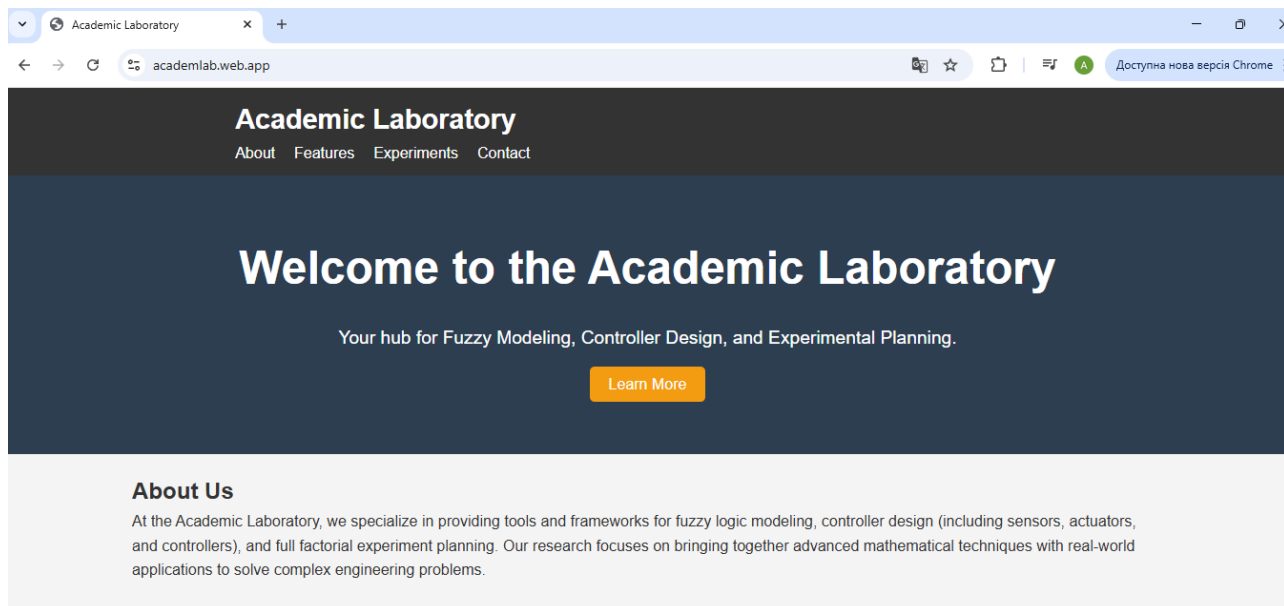


Рисунок 1 - Головна сторінка віртуальної лабораторії Academic Laboratory

Безкоштовна віртуальна лабораторія Academic Laboratory є унікальною платформою, призначеною для моделювання об'єктів дослідження дослідниками, студентами та професійними фахівцями. Програмне забезпечення характеризується інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом і розширеним функціоналом для моделювання та аналізу, що забезпечує його застосовність як в академічному, так і в практичному контексті різних галузей.

Особливістю даної лабораторії є можливість не лише створення тривимірних візуалізацій досліджуваних об'єктів, але й моделювання їхньої поведінки на основі визначених користувачем правил, вхідних і вихідних параметрів, що адаптуються до специфічних вимог дослідження. Платформа дозволяє здійснювати перевірку гіпотез без необхідності фізичного прототипування, що суттєво знижує фінансові та матеріальні витрати, а тривимірні моделі сприяють скороченню часу, необхідного для підготовки та проведення віртуальних експериментів.

На основі отриманих практичних даних роботи установки отримання сульфату амонію з коксового газу побудували багатофакторну математичну модель при використанні функціоналу Academic Laboratory, яка має вид:

$$m=0.000171+(3\cdot 10^{-5})\cdot a+0.003856\cdot b+0.015268\cdot c-0.009228\cdot d+0.00169\cdot e-0.000485\cdot f+0.014108\cdot g+(2,3\cdot 10^{-5})\cdot h+0,001078\cdot i$$

де:

a — кількість коксового газу, м³/год;

b — тиск газу, мм вод. ст.;

c — опір сатуратора, мм вод. ст.;
 d — температура розчину, °C;
 e — температура газу, °C;
 f — кислотність маточного розчину, pH;
 g — насиченість маточного розчину, %;
 h — сульфатна кислота у сульфаті амонію в штабелі, %;
 i — вода у сульфаті амонію в штабелі, %.

На рисунку 2 показано загальний вид вікна введення та обробки даних в Academic Laboratory.

Рисунок 2 - Загальний вид для введення і обробки даних в лабораторії Academic Laboratory

Коефіцієнт детермінації отриманої математичної моделі R^2 становить 0,92. Це означає, що 92 % варіації виходу сульфату амонію пояснюється математичною моделлю. Це дуже високий показник, що свідчить про хорошу відповідність моделі даним.

Згідно розрахунків, найбільший вплив на вихід сульфату амонію мають: концентрація сульфатної кислоти; кислотність маточного розчину; тиск газу; температура розчину. Опір сатуратора та насиченість маточного розчину мають незначний, але прямий вплив.

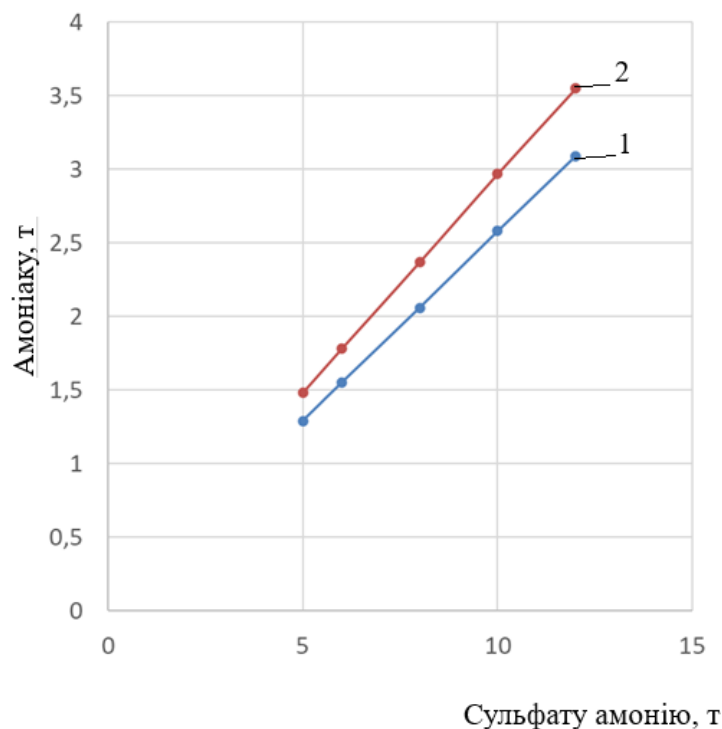
Результати порівняння залежності виходу сульфату амонію (t) від амоніаку (t) у коксовому газі стехіометрично розрахованого і розрахованого згідно математичної моделі (фактичних значень роботи установки) представлено на рисунку 3.

Проведене порівняння теоретично розрахованого стехіометричного виходу сульфату амонію з практичним виходом, змодельованим у віртуальній лабораторії, демонструє принципові відмінності в підходах. Теоретичний вихід визначається виключно на основі стехіометрії реакції, виходячи з кількості реагентів, що вступили у взаємодію, та їхніх молярних мас, і являє собою максимально можливий результат за відсутності будь-яких втрат.

Натомість, розроблена математична модель є емпіричною, тобто її побудова здійснена на основі статистичного аналізу експериментальних даних, що відображають вплив комплексу технологічних параметрів на вихід цільового продукту.

Ключові відмінності полягають у тому, що теоретичний розрахунок, оцінюючи граничний вихід, ігнорує неминучі технологічні втрати та побічні реакції, тоді як емпірична

багатофакторна модель, враховуючи реальні умови протікання процесу, включаючи згадані втрати та вплив операційних параметрів, забезпечує більш надійний прогноз, точність якого безпосередньо залежить від якості та обсягу використаних експериментальних даних.



1 – стехіометрично розраховане значення; 2 – значення розраховані згідно математичної моделі (фактичних значень роботи установки)

Рисунок 3 – Залежність виходу сульфату амонію (т) від амоніаку (т) у коксовому газі

На розбіжності між теоретичними та емпіричними значеннями впливає низка факторів, серед яких: неповнота завершення основної реакції, протікання побічних реакцій, втрати продукту на етапах кристалізації та очищення, похибки вимірювання технологічних параметрів, а також якісний склад використовуваної сировини.

Зважаючи на це, для забезпечення точного прогнозу виходу сульфату амонію в умовах реального виробництва рекомендується використання емпіричної моделі, розробленої в лабораторії Academic Laboratory на основі верифікованих експериментальних даних, оскільки вона інтегрує вплив усіх значущих технологічних факторів.

Аналіз результатів свідчить про те, що практично визначений вихід продукту є вищим за теоретичний орієнтовно на 15 %. Графічне представлення залежності виходу якісного сульфату амонію з мінімальним рівнем вологості від показника кислотності маточного розчину, отримане на основі побудованої математичної моделі, наведено на рисунку 4.

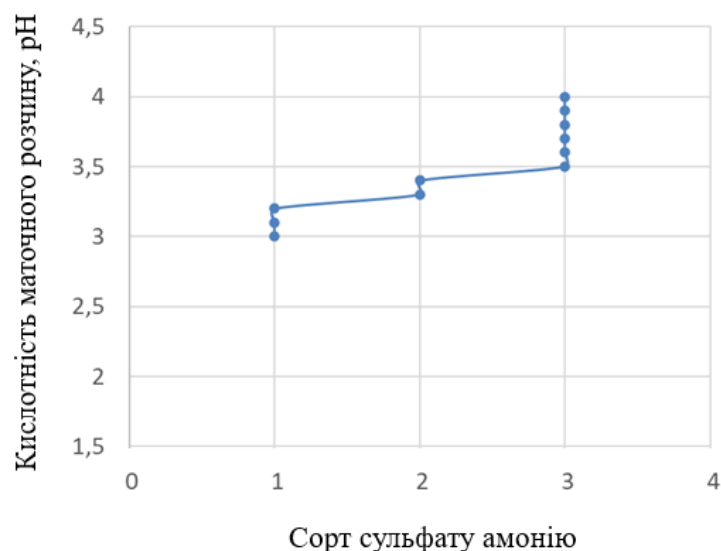


Рисунок 4 – Залежність якості отриманого сульфату амонію (сорт) від кислотності маточного розчину, pH

Отримана математична модель дозволяє встановити наступні закономірності щодо впливу кислотності маточного розчину на сортність сульфату амонію:

- Кислотність маточного розчину в діапазоні 3 – 3,2, що корелює з концентрацією сульфатної кислоти 93 – 96 %, є оптимальною для виробництва очищеного сульфату амонію (сорт сталі), що на графіку відображено під номером 1.

- Підвищення кислотності маточного розчину до 3,3 – 3,4 (концентрація сульфатної кислоти 90 – 92 %) сприяє утворенню агрономічного сульфату амонію першого сорту, який на графіку позначено цифрою 2.

- Подальше збільшення кислотності маточного розчину до 3,5 – 4,0 (концентрація сульфатної кислоти 75 – 89 %) зумовлює утворення сульфату амонію другого сорту – технічного, що представлено на графіку під номером 3.

Висновки. 1. Використання інформаційних технологій при прогнозуванні технологічних параметрів є вкрай важливим і актуальним, особливо в умовах воєнного часу, коли стабільність постачання сировини порушена, а ефективність виробництва має критичне значення. Віртуальні симуляції, такі як Academic Laboratory, дозволяють швидко моделювати складні процеси, оптимізувати витрати ресурсів і передбачати якість готової продукції без додаткових матеріальних затрат.

2. На тлі дефіциту сировини під час війни за допомогою віртуальної лабораторії Academic Laboratory досліджено оптимізацію виробництва сульфату амонію на ПРАТ «ЮЖКОКС». Побудовано багатофакторну математичну модель (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,92$) для прогнозування виходу та якості добрива. Практичний вихід продукту за моделлю на 15% перевищує теоретичний.

3. Встановлено, що найбільший вплив на вихід мають: концентрація сульфатної кислоти, кислотність маточного розчину, тиск, температура розчину. Визначено оптимальні діапазони кислотності для різних сортів сульфату амонію: 3,0–3,2 – очищений; 3,3–3,4 – агрономічний (1 сорт); 3,5–4,0 – технічний (2 сорт).

4. Рекомендовано застосовувати емпіричну модель Academic Laboratory для точнішого прогнозування виходу в реальних умовах, з урахуванням технологічних змін та можливих втрат.

1. Ju, J., Feng, Y., Li, H., Xu, C., Xue, Z., & Wang, B. (2023). Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, 457, 141197. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141197>

2. Zhang, S., Li, C., & Xu, K. (2023). Coke oven gas purification. *Living Reference Work Entry*, 1–4. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-981-19-0740-1_1010-1
3. Valera-Medina, A., & Roldan, A. (n.d.). Ammonia from steelworks. *ORCA – Online Research @ Cardiff*. https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/128477/1/Agustin_Valera_Medina_Manuscript_draft2_final.docx.doc.pdf
4. Peng, Z. (2017). Recovery and utilization of coking chemical products. In *International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering* (Vol. 114, pp. 455–458).
5. Kern, W., Bohmfalk, H. J., Dreis, P., Resende, H., & Júnior, S. (n.d.). Modernization of existing coke oven gas treatment plants to improve plant performance and meeting environmental requirements. *ORCA – Online Research @ Cardiff*. https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/128477/1/Agustin_Valera_Medina_Manuscript_draft2_final.docx.doc.pdf

ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЦИФРОВОГО, МАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ

Войтусік Степан, Ісаков Олександр
Національний університет «Львівська політехніка»
Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології
Львів, Україна
stepan.s.voitusik@lpnu.ua, oleksandr.isakov.mkb.2018@lpnu.ua

Abstract. At the current stage of development of science, technology and society, the technogenic impact on the environment is increasing. The increase in the generation of electromagnetic noise by the industry has led to the emergence of such a concept as “electromagnetic space (spectrum)”, in which various processes are currently taking place, and which must be regulated at the legislative level. Military operations are also taking place in this space. Therefore, research in the field of finding new methods and means of monitoring magnetic, electromagnetic radiation, as well as countering enemy systems is an urgent task that requires further solution. The combination of active and passive technologies (monitoring, active noise suppression, shielding, etc.) together with cyber defense gives the best result.

Keywords: Electromagnetic noise, noise pollution, environment, pseudo noise sequences, pseudo random sequence generators.

Анотація. На сучасному етапі розвитку науки, техніки і суспільства зростає техногенний вплив на навколишнє середовище. Збільшення генерації промисловістю електромагнітних шумів призвело до виникнення такого поняття як “електромагнітний простір (спектр)”, в якому відбуваються різноманітні процеси, і який необхідно регулювати на законодавчому рівні. В даному просторі також відбуваються і військові дії. Тому дослідження в області пошуку нових методів і засобів моніторингу магнітного, електромагнітного випромінювання, а також протидії ворожим системам є нагальним завданням, що потребує подальшого вирішення. Поєднання активних і пасивних технологій (моніторинг, активне шумозаглушення, екранування тощо) разом із кіберзахистом дає найкращий результат.

Ключові слова: Електромагнітний шум, шумове забруднення, довкілля, псевдо шумові послідовності, генератори псевдовипадкових послідовностей.

1. Вступ.

Шумове забруднення – це надмірна і постійна присутність небажаних сигналів у довкіллі. Воно має різну природу: від акустичного (звукового) до електромагнітного, з джерелами як природного, так і антропогенного походження. Природними джерелами є грозові розряди, космічне фонове випромінювання тощо; неприродними – транспорт, промислове обладнання, електронні пристрої та телекомунікаційні системи. Шумове забруднення визнане серйозним екологічним фактором, особливо в містах: воно знижує якість життя людей і негативно впливає на фауну[1-4]. Водночас електромагнітний «цифровий» шум у сфері інформаційних технологій створює перешкоди для роботи електронних систем. Сучасне електромагнітне оточення насичене сигналами, що підвищує ризик збоїв технічних систем [5]. Крім того, наявність магнітного поля землі, яке захищає усе живе, також треба враховувати наприклад при проведенні різноманітних досліджень хімічного складу матеріалів, їх поверхні із застосуванням різноманітних спектрометрів електронної спектроскопії, мас – спектрометрії, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та ін. [7-9]. Таким чином, проблема шуму поєднує аспекти захисту середовища та кібербезпеки: що породжує необхідність мінімізації впливу небажаних шумів.

2. Проблематика.

Акустичний шум і електромагнітні завади є формами забруднення, що шкодять як природі, так і технологічним процесам. Тривалий вплив сильного шуму погіршує здоров'я людини (стрес, порушення сну, втрата слуху) і дезорієнтує тварин. Зростаюча кількість бездротових систем зв'язку, поява все більшої кількості різноманітних цифрових пристроїв, що передають інформацію по даним системам передачі даних збільшення кількості електротехнічних установок призводять до зростанню електромагнітного навантаження на навколишнє середовище. Що в свою чергу при певних його значеннях можуть негативно впливати на здоров'я людини.

Електромагнітний шум, наприклад радіочастотні завади від ліній електропередач чи передавачів, може порушувати роботу чутливих приладів і систем навігації тварин. У контексті приладів, завади знижують якість бездротового зв'язку та точність датчиків. Так більш прискіпливої уваги до електромагнітних шумів вимагають засоби вимірювання енергії заряджених частинок, які застосовуються в електронній, іонній та інших видах спектроскопії [7-9]. Наявність ліній електропередач, метрополітену та інших джерел постійних та змінних електромагнітних полів поряд із лабораторією, в якій проводяться дані дослідження, може суттєво знизити чутливість даних приладів. Тому для компенсації постійних і змінних електромагнітних полів застосовуються різноманітні засоби і методики. Системи моніторингу та зв'язку можуть давати хибні показники або виходити з ладу під впливом перешкод. Таким чином небажані шуми є ризиком доступності інформації, що є проблематикою захисту інформації.

Наряду із слабкими електромагнітними полями суттєво небезпечними для здоров'я людини є потужні випромінювання від радіолокаційних станцій, застосування яких вимагає захисту персоналу від їх шкідливого впливу.

Небезпечними є й навмисні шумові впливи. У кібербезпеці відомі атаки типу глушіння (jamming), коли зловмисник генерує потужний радіосигнал, порушуючи роботу мережі. Це особливо критично для бездротових IoT-систем моніторингу довкілля. Інший вектор – несанкціоноване перехоплення випромінювань. Електронні прилади ненавмисно випромінюють електромагнітні сигнали з інформацією про оброблювані дані; перехоплення таких випромінювань може здійснюватися непомітно (без фізичних слідів втручання). Уразливими є монітори, клавіатури, принтери тощо [6]. Отже, шум є фактором ризику і для довкілля, і для захисту інформації, що зумовлює потребу комплексної протидії.

3. Методи та моделі зниження магнітного впливу.

Для врахування впливу зовнішніх магнітних полів і таким чином створення умов для більш точної роботи приладів, що вимірюють енергії заряджених частинок, які в свою чергу

використовуються в різноманітних спектрометрах, ще в середині 50-их років минулого століття були створені системи компенсації магнітного поля. Класичним засобом для компенсації магнітних полів землі та паразитних полів від інших приладів є так звана система Гельмгольца, що складається із двох катушок достатньо великого діаметру, розмішених на відстані одна від одної, рівній їх радіусу. Катушки Гельмгольца зазвичай використовують для компенсації магнітного поля в 3-х взаємоперпендикулярних напрямках.

Так в [8] наведено 4 модифікації конфігурацій базової моделі катушок Гельмгольца. В 1-му випадку необхідно було отримати максимальну однорідність вертикальної складової магнітного поля вдоль центральної орбіти електронів, що пролітали в полі аналізатора, а не в центрі системи. Схема типового аналізатора енергії електронів наведена на рис. 1.

В такому випадку виконується наступне співвідношення:

$$175a^6y^5 + 120a^8y^3 + 64a^{10}y - x^2(12a^6y^3 + 4200a^4y^5) - x^4(640a^6y + 1800a^4y^3 - 8400a^2y^5) - x^6(2240y^5 + 1280a^4y - 480a^2y^3) - 960x^8(a^2y - y^3) - 256x^{10}y = 0,$$

a – радіус катушки, x – половина відстані між катушками, y – радіус центральної орбіти.

Якщо взяти $a = 2$ м., $y = 0,3$ м., то згідно даного рівняння $x = 0,98$ м.

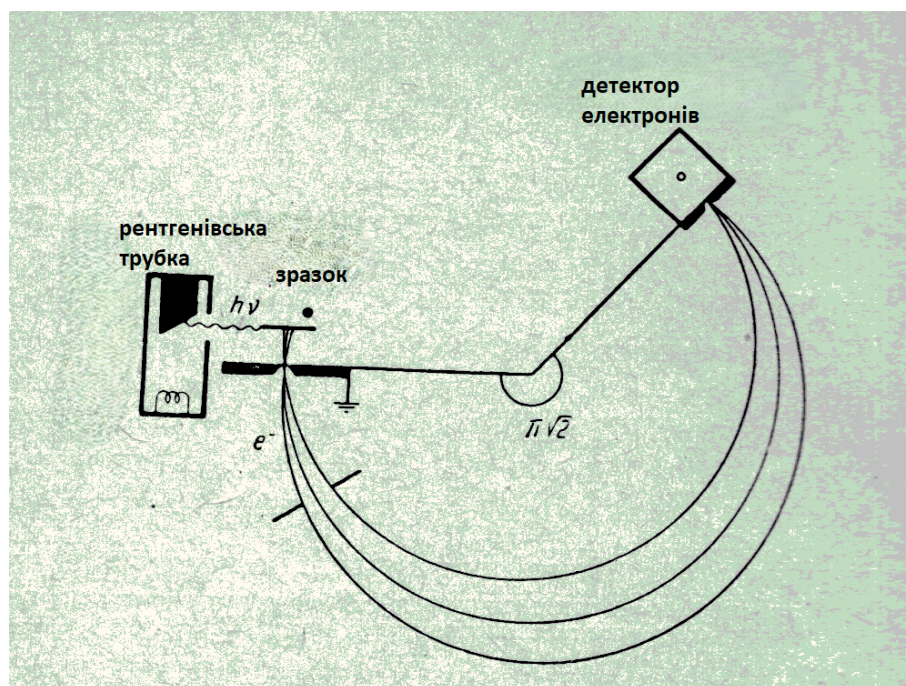


Рис.1. Схема метода електронної спектроскопії для хімічного аналізу, що використовується для дослідження спектру електронів, що емітуються із атомів рентгенівськими променями [8].

В іншому випадку, для компенсації вертикальної складової поля 50 – сантиметрового приладу була вибрана система із 4-х катушек однакового діаметру. В даному випадку при розкладі в ряд Тейлора магнітного поля, що утворюється в даній системі катушек, в нуль перетворюються перші сім членів розкладу і об'єм, в якому утворюється однорідне поле, значно більше, ніж при використанні системи на 2-х катушках.

В третьому варіанті замість кругових катушек використовують пару квадратних катушек. Дана конфігурація катушек дає можливість зручніше розмістити весь прилад для керування ним оператором. Квадратні катушки утворюють при компенсації горизонтальних складових достатньо однорідне поле, оскільки для цих складових взаємна компенсація полів є не такою важливою, як для вертикальної складової. Розрахунки поля для 30-сантиметрового приладу дають оптимальну відстань між катушками (розміру 2 м. х 2 м.) складає 0,575 ребра катушки.

І в 4-му випадку розглядається варіант коли інші магніти можуть створювати паразитні поля, які утворюють градієнт зовнішнього магнітного поля. Так в 50-

сантиметровому приладі було виявлено градієнт вертикальної складової $5 \cdot 10^{-5}$ гс/м а паразитне поле синхроциклотрона збільшувало цей градієнт в 4 рази. Однак даний градієнт вдалося компенсувати шляхом порушення коаксіальності обох пар кругових катушок.

На сучасному етапі розвитку систем компенсації градієнтів магнітного поля розроблені і використовуються нові методи компенсації, що використовують багатоточкові давачі і дозволяють усувати ефекти вихрових потоків наприклад в установках магніто резонансної томографії [10].

4. Методи та моделі зниження електромагнітного впливу.

Один із дієвих підходів зменшення електро-магнітних (ЕМ) шумів – активне шумозаглушення (Active Noise Control, ANC). Принцип ANC – генерувати «антишум», тобто хвилю тієї ж амплітуди, але в протифазі до небажаного звуку. Накладання двох хвиль рівної амплітуди зі зсувом фаз на 180° призводить до їх взаємного гасіння (нульового результуючого сигналу) [7]. Для реалізації ANC використовують адаптивні фільтри, що підлаштовуються під динаміку шуму. Зокрема, алгоритм найменших середніх квадратів (LMS) ітеративно налаштовує коефіцієнти фільтра так, щоб мінімізувати різницю між шумом і антишумом. Останніми роками ведуться дослідження із застосування ANC для зниження міського шуму. Хоча придушення дорожнього шуму в реальних умовах залишається складним (через широкий спектр і мінливість), експериментальні ANC-системи на основі LMS демонструють помітне зменшення рівня транспортного гуркоту на критичних ділянках [7].

Доповненням до активних методів є пасивне шумопоглинання – звукоізоляційні матеріали, бар'єри та екрани. У містобудуванні застосовують акустичні екрани вздовж автошляхів, що знижують рівень шуму для прилеглих районів. Для електромагнітних завад ефективне рішення – електромагнітне екранування (наприклад, клітка Фарадея), яке блокує проникнення ЕМ-випромінювань. Такий підхід захищає чутливу апаратуру від зовнішніх полів і запобігає витоку випромінювання з обладнання. Існують стандарти, що регламентують граничні рівні побічних електромагнітних випромінювань [11-14]. Дотримання цих норм підвищує інформаційну безпеку і одночасно зменшує електромагнітне навантаження на довкілля. До пасивних методів також належить фільтрація – екрановані кабелі, феритові фільтри на проводах тощо для зниження високочастотних завад.

5. Моніторинг та моделювання.

Важливим напрямом є моніторинг шумового забруднення із застосуванням Інтернету речей. Мережі сенсорів у реальному часі відстежують рівні шуму та передають дані для аналізу. Це допомагає виявляти «гарячі точки» і перевіряти ефективність протишумових заходів. У контексті кібербезпеки моніторинг ЕМ-сигналів використовується для виявлення несанкціонованих передавачів і спроб глушіння, аби вчасно перейти на резервний зв'язок. Прикладами засобів моніторингу ЕМ-сигналів може бути наступне професійне обладнання і програмне забезпечення для спектрального моніторингу з ціллю виявлення джерел шуму наприклад від компанії Rohde & Schwarz [15]:

- системи аналізу стільникової мережі пропонує програмно-апаратне рішення для аналізу стільникових мереж через радіоінтерфейс;
- системи протидії дронів (ARDRONIS) дають можливість виявляти, ідентифікувати, локалізувати, відстежувати перевіряти і протидіяти зловмисним та некооперативним загрозам відповідно до вимог користувачів;
- цифрові широкосмугові реєстратори;
- моніторингові антени;
- прилади системи радіомоніторингу;
- системи радіомоніторингу;
- приймачі та радіопеленгатори (охоплюють діапазон від 8 КГц до 40 ГГц);
- системи аналізу сигналів, нучкі та автоматичні багатоканальні рішення для виявлення, класифікації та обробки радіокомунікаційних сигналів;
- моніторинг стану системи;

- програмне забезпечення моніторингу.

Компанією Tektronix крім випуску обладнання і систем моніторингу ЕМ-сигналів надаються також послуги тестування обладнання на відповідність вимогам електромагнітної сумісності (Electromagnetic Compatibility, EMC) і електромагнітних завад (Electromagnetic Interference, EMI) з видачею сертифікатів відповідності [16].

Прикладом моніторингу в енергетиці є компанія Omicron [17]. В їх арсеналі:

- системи для моніторингу часткових розрядів на підключеному обладнанні;
- системи неперервного моніторингу часткових розрядів;
- системи моніторингу часткових розрядів на ультрависоких частотах;
- та багато інших систем моніторингу.

Розвиваються також математичні моделі оцінки впливу шумів та завад. Так наприклад одним із методів видалення шумів інформаційних сигналів в електричних мережах є використання різних типів вейвлет-перетворень, що було продемонстровано в роботі [18] на прикладі використання вейвлетів Добеші, сімлетів, біортогональних койфлетів. Для електромагнітних полів застосовують класичні підходи (вагові коефіцієнти, ймовірнісний аналіз) і методи штучного інтелекту. Огляд [4] показує, що жодна окрема модель не охоплює всі сценарії, тому пропонується об'єднувати кілька методик та залучати нейронні мережі для підвищення адаптивності оцінювання.

6. Приклади застосувань.

У містах уже розгортаються розумні системи моніторингу шуму (ІоТ-сенсори, хмарні платформи), що аналізують шум в різних спектрах. На основі цих даних ухвалюють рішення – від коригування трафіку до встановлення додаткових шумозахисних екранів та пристроїв виявлення БПЛА. Розробляються й активні шумові бар'єри: пристрої з динаміками і датчиками, які в реальному часі генерують протифазний «антишум» для нейтралізації міського гуркоту. Хоч повномасштабне впровадження ANC у відкритому середовищі ще потребує досліджень, прототипи вже забезпечують зниження рівня транспортного шуму на кілька децибел [4]. У сфері електромагнітної безпеки активно застосовуються сучасні матеріали для екранування та фільтрації. Ефективні ЕМ-екрани можна створювати без суттєвого впливу на роботу пристроїв. Зниження випромінювання від гаджетів мінімізує ризик перехоплення даних і зменшує радіоперешкоди.

На противагу захисту від електромагнітних шумів питання радіоелектронної боротьби ставить цілком протилежні задачі, не захищатись а створювати електромагнітні шумоподібні сигнали, в яких ефективно застосовуються генератори шумоподібних послідовностей. Генератори псевдовипадкових шумів (ГПШ) створюють широкосмуговий або вузькосмуговий шум, що перекриває частоту роботи ворожої радіолокаційної або зв'язкової системи. ГПШ застосовують для створення завад, маскування сигналів, імітації активності або обману ворожих систем. Це одна з ключових технологій у сучасній тактиці радіоелектронної боротьби. Прикладом може бути отримання білого шуму на екрані ворожої радіолокаційної станції замість відмітки літака. Також псевдовипадкові сигнали використовуються для маскування власних передач, щоб зменшити ймовірність виявлення (Low Probability of Intercept - LPI). Наприклад, GPS-модуляція з розширеним спектром (spread spectrum) також є варіацією цього принципу.

ГПШ застосовуються для імітації сигналів, які схожі на справжні — щоб обманути системи ППО, РЛС тощо. Можна створювати фальшиві "мішені" або "відгуки", які виглядають правдоподібно на радарі. У системах перешкод GNSS-сигналам застосовують багатоканальні генератори шуму, які накладаються на сигнали GPS, Galileo, GLONASS. Часто використовують псевдовипадкову модуляцію фази (PRN-маски), щоб зробити завади важкодетектованими. Приклад простої системи перешкод на ГПШ наведено на рис.2. В даному випадку генерується псевдовипадков шумоподібної послідовності генер, яка в свою чергу модулює НВЧ-сигнал, що посилюється та передається як перешкода. Часто налаштовується динамічно, під частоту "жертви".

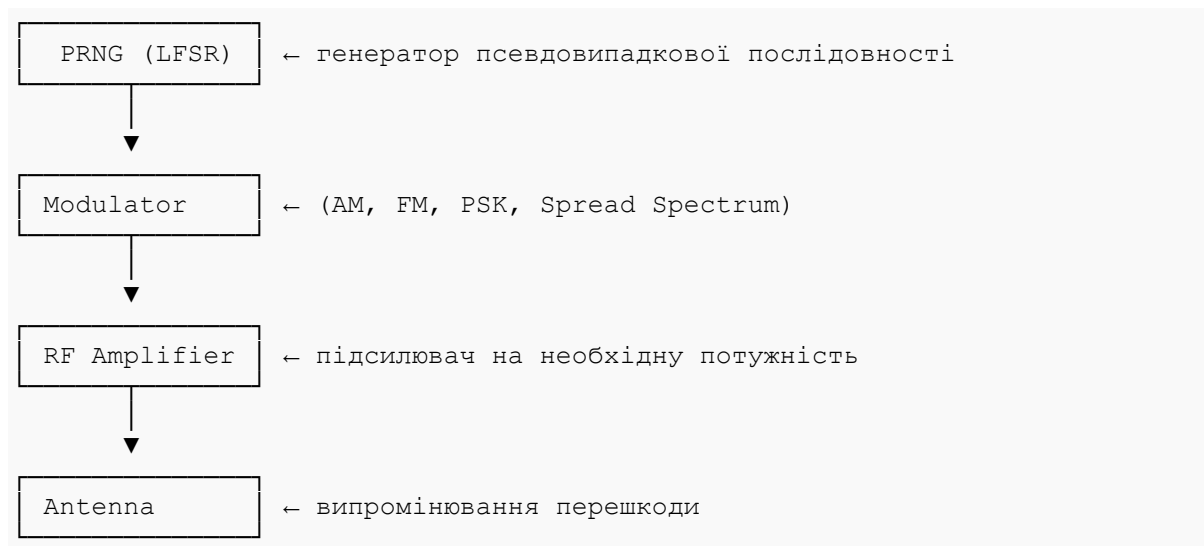


Рис.2. Блок-схема простої системи перешкод на ГПШ

7. Законодавство.

Сфера захисту від електромагнітного забруднення в усьому світі регулюється законодавчо на державному рівні. Так в Аналітичній записці з питань порівняльного законодавства щодо застосування терміна “електромагнітний простір” у деяких державах членах НАТО [19], представленій Дослідницькою службою Верховної Ради України було запропоновано ввести в нормативно-правовий обіг поняття “ «електромагнітний простір (спектр)», прийнявши відповідну програму/стратегію/ доктрину із забезпеченням державного оборонного замовлення, а також утворивши в Україні аналог закордонних науково-дослідних оборонних установ на кшталт американського Агентства передових оборонних дослідницьких проєктів (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA).” Проведений в [19] аналіз законодавчої бази США, Великої Британії, Іспанії, Норвегії, Туреччині, Франції призвів до уточнення темів пов'язаних із радіоелектронною боротьбою, радіоелектронним забрудненням тощо.

В Україні на сьогоднішній день діє «Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання» затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 1077 від 16 грудня 2015 р. Зі змінами та доповненнями. Згідно із цим регламентом будь-яка апаратура чи стаціонарна установка, яка здатне створювати електромагнітні випромінювання чи призводити до появи електромагнітних випромінювань, що перевищують рівень, за якого технічні засоби електронних комунікацій, радіообладнання та інше обладнання функціонує за призначенням, повинна відповідати наведеним технічним вимогам. Цей Технічний регламент розроблений на основі Директиви 2014/30/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 26 лютого 2014 р. про гармонізацію законодавства держав-членів стосовно електромагнітної сумісності [20].

8. Висновки.

Цифровий, магнітний та електромагнітний шум – багатогранна проблема яка впливає як на навколишнє середовище так і на електроніку та комунікаційні системи. Актуальні дослідження спрямовані на стримування негативного впливу шумів на людей і природу при одночасному забезпеченні стійкості інформаційних систем. Поєднання активних і пасивних технологій (моніторинг, ANC, екранування тощо) разом із кіберзахистом дає найкращий результат. Комплексний підхід вже демонструє ефективність на практиці. Дослідження електромагнітного шуму має також важливе значення для використання у військовій сфері. Продовження досліджень у цій галузі є необхідним задля збереження довкілля та захисту інформації в умовах зростання джерел електромагнітного та цифрового шуму, протидії ворожим діям в умовах сучасної війни.

1. Estrella, I., Pacheco, A., Marin, W., Pacheco-Pumaleque, L., Cuba-Carbajal, N., Pucuhuayla-Revatta, F., Felix-Poicon, E., & Añaños-Bedriñana, M. (2024). Tackling Noise: Technology Integration for Improved Noise Pollution Monitoring. // *Environmental Health Insights*, 18.
2. Vignati, M. & Giuliani, L. (2010). Radiofrequency exposure, health risks and society. *European Journal of Oncology Library*, 5, 187–218.
3. Lai, H. (2010). Biological effects of radiofrequency electromagnetic field. In: *BioInitiative Report*.
4. Zelyukh, I.M., et al. (2018). Analysis of Electromagnetic Pollution in Urban Environments. *Journal of Electrical Engineering*, 69(3), 211–218.
5. Li, M., & Wei, G. (2023). A review of quantitative evaluation of electromagnetic environmental effects: Research progress and trend analysis. *Sensors*, 23(4257). <https://doi.org/10.3390/s23084257>
6. Antić, V., Protić, D., Stanković, M., Prodanović, R., Manić, M., Ostojić, G., Stankovski, S., & Kučević, D. (2024). Protecting data at risk of unintentional electromagnetic emanation: TEMPEST profiling. *Applied Sciences*, 14(4830). <https://doi.org/10.3390/app14164830>
7. Yang, B., Yin, J., Ye, Z., Yang, S., & Wang, L. (2024). Development and testing of an active noise control system for urban road traffic noise. *Applied Sciences*, 14(1), 175. <https://doi.org/10.3390/app14010175>
8. Zigban, K., Nordling, C., Fahlman, A., Nordberg, R., Humrin, K., Hedman, J., Johansson, G., Bergmark, T., Larsson, S., Lindgren, I., & Lindberg, B. (1967). ESCA. Atomic, molecular, and solid state structure studied by means of electron spectroscopy. *Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsaliensis/Upsala*.
9. Zigban, K., Nordling, C., Larsson, S., Hagstrum, S.-E., Fahlman, A., & Andersson, I. (1964). *Nucl. Instr. And Meth*, 27(173).
10. Spees, W. M., Buhl, N., Sun, P., Ackerman, J. J., Neil, J. J., & Garbow, J. R. (2011). Quantification and compensation of eddy-current-induced magnetic-field gradients. *Journal of Magnetic Resonance*, 212(1), 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2011.06.016>
11. International Electrotechnical Commission. (n.d.). *EC 61000-4-X—Electromagnetic compatibility (EMC) standards*.
12. Department of Defense. (2016). *MIL-STD-461G—Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*.
13. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). *IEEE Std C63.4-2014—Methods of measurement of radio-noise emissions*.
14. Ott, H. W. (2011). *Electromagnetic compatibility engineering*. Wiley.
15. Rohde & Schwarz. (n.d.). *Radiomonitoring for aerospace, defense, and security*. Retrieved from https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/radiomonitoring_254745.html
16. Tektronix. (n.d.). *EMI/EMC testing solutions*. Retrieved from <https://www.tek.com/en/solutions/application/emi-emc-testing>
17. Omicron Energy. (n.d.). *All products*. Retrieved from <https://www.omicronenergy.com/ru/all-products/>
18. Voloshko, A. V., & Bushinsky, B. A. (n.d.). Видалення шумових компонентів інформаційних сигналів в електричних мережах за допомогою ортогональних вейвлет-перетворень [Removal of noise components of information signals in electric networks using orthogonal wavelet transforms]. *Ел. арх. наук. та освітніх матеріалів Київського політехнічного інституту* (pp. 211–213). Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/73d8e3fd-448a-4aed-a7e0-0ce4f17b1b7/content>
19. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). Аналітична записка з питань порівняльного законодавства щодо застосування терміна «електромагнітний простір» у деяких державах членах НАТО [Analytical note on comparative legislation on the use of the term "electromagnetic

space" in some NATO member states]. Retrieved from <https://research.rada.gov.ua/uploads/documents/33474.pdf>

20. Verkhovna Rada of Ukraine. (2015). *Закон України про захист інформації в автоматизованих системах* [Law of Ukraine on information protection in automated systems]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-п#n13>

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ВИТРАТАМИ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ПІДПРИЄМСТВА

Гембарська Наталія
Національний університет «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
nataliya.y.bilinska@lpnu.ua

Анотація. Екологічна безпека є важливою сферою діяльності підприємств, яка забезпечує його сталий розвиток та сприяє захисту навколишнього середовища шляхом мінімізації забруднення, раціонального використання ресурсів та впровадження екологічних технологій. Якісне інформаційне забезпечення є підґрунтям ефективного управління екологічною безпекою підприємства. В даному дослідженні розкрито завдання підприємств щодо екологічної безпеки, ключові аспекти моніторингу дотримання екологічної безпеки та чинники, які ускладнюють забезпечення екологічної безпеки в умовах сьогодення. Проаналізовано особливості організації процесу формування обліково-аналітичної інформації щодо витрат на екологічну безпеку підприємства; вказано напрями його удосконалення із врахуванням існуючих викликів та перспектив.

Ключові слова: інформаційне забезпечення, витрати на екологічну безпеку, облік витрат на екологічну безпеку, управління витратами на екологічну безпеку.

Abstract. Environmental safety is an important area of enterprise activity that ensures its sustainable development and contributes to environmental protection by minimizing pollution, using resources rationally, and implementing ecological technologies. High-quality information support is the foundation of effective management of an enterprise's environmental safety. This study outlines the tasks of enterprises in the field of environmental safety, key aspects of monitoring compliance with environmental safety, and factors that complicate the provision of environmental safety in today's conditions. The features of organizing the process of forming accounting and analytical information regarding the costs of the enterprise's environmental safety are analyzed; directions for its improvement are indicated, taking into account existing challenges and prospects.

Keywords: information support, environmental safety costs, accounting for environmental safety costs, environmental safety cost management.

Поняття екологічної безпеки охоплює різні аспекти життєдіяльності людини, які особливо гостро постають в умовах воєнного стану через руйнування інфраструктури, різного роду забруднення довкілля, руйнування екосистем. Захист довкілля є запорукою сталого розвитку людства та його життєдіяльності. Завданнями підприємств у цьому контексті є:

- мінімізація забруднення;
- раціоналізація використання ресурсів;
- впровадження екологічних програм;

- організація систем утилізації та переробки відходів;
- використання інноваційних та новітніх екологічних технологій;
- підвищення екологічної свідомості та ініціативи працівників;
- виконання вимог екологічного законодавства та співпраця з державою і громадськими організаціями.

Моніторинг дотримання підприємством параметрів екологічної безпеки включає:

- регулярне оцінювання стану довкілля та відповідності діяльності підприємства екологічним стандартам;
- оцінювання впливу на довкілля, виявлення і прогнозування потенційних ризиків;
- перевірка відповідності діяльності підприємства вимогам стандартів;
- відкритість екологічної інформації для органів влади, місцевого самоврядування та громадськості;
- активне та своєчасне реагування на проблемні зони (розробка рекомендацій щодо покращення екологічної безпеки і їх впровадження);
- регулярна звітність про стан довкілля та результати моніторингу.

Дотримання цих параметрів на сьогоднішній день у нашій країні ускладнюється:

- військовими діями;
- недостатністю фінансування;
- низьким рівнем екологічної свідомості;
- недосконалістю законодавства;
- кліматичними змінами тощо.

А. Гавривлюк [1, с. 97] розглядає управління екологічними витратами як процес досягнення цілей за допомогою комплексу дій, який відображається через низку функцій, що перебувають в безперервному циклічному взаємозв'язку. Такими функціями є:

- планування екологічних витрат;
- організування центрів відповідальності за екологічними витратами;
- мотивування працівників за оптимізацію екологічних витрат;
- контролювання екологічних витрат;
- регулювання екологічних витрат [1, с. 98 - 99].

Ключову роль в процесі управління витратами на екологічну безпеку підприємства відіграє його інформаційне забезпечення, яке охоплює збір, аналіз, зберігання та передачу даних. В основному, така інформація формується в процесі обліково-аналітичної обробки даних про витрати на екологічну безпеку підприємства.

Питання обліку витрат, пов'язаних з екологічною безпекою підприємств, розглядаються у працях багатьох вчених економістів, зокрема, Давидюк Т. [2], Замули І. [3], Колісник О., Гордієнко Т. [4], Кондратюк О. [5], Очеретько М., Другакової А. [6], Пелиньо Л. [7], Совик М. [8] та інших.

В умовах воєнного стану та швидких змін в науково-технологічній сфері актуалізуються нові запити, пов'язані з обліково-аналітичним забезпеченням управління витратами на екологічну безпеку, які потребують наукового обґрунтування та удосконалення деяких аспектів облікової методології.

Основним завданням обліку витрат на екологічну безпеку підприємства є забезпечення користувачів якісною числовою інформацією про ресурси, витрачені на досягнення екологічної безпеки, їх результативність та наступні потреби, що дасть змогу прийняти адекватні рішення й окреслити стратегічні цілі у даній сфері, сприятиме виконанню усіх функцій управління екологічними витратами.

Облік екологічної діяльності є не лише підсистемою бухгалтерського обліку, а й частиною системи екологічного менеджменту, інформаційною основою для проведення екологічного аудиту, страхування й оцінювання інвестиційних проектів [5, с. 23].

В науково-практичній літературі зустрічаються поняття «екологічні витрати» та «витрати на екологічну безпеку» - вони відрізняються своїм змістом та спрямованістю. Екологічні витрати - поняття ширше, охоплює всі витрати, пов'язані з впливом

господарської діяльності підприємства на довкілля. Витрати на екологічну безпеку – це витрати, спрямовані на забезпечення безпеки довкілля від потенційних загроз, вони мають на меті захист здоров'я людей, природних ресурсів та екосистем і зосереджені на заходах, які мінімізують ризики екологічних катастроф, таких як аварії на хімічних підприємствах, витоки небезпечних речовин тощо.

На законодавчому рівні нормативними документами з обліку витрат є:

- Закон України «Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні» [9], який регламентує загальні організаційні моменти обліку витрат та вимоги до їх відображення у фінансовій звітності;

- Національне положення (стандарт) бухгалтерського обліку 16 «Витрати» [10] - ключовий документ, який використовують для організації облікового процесу щодо витрат на екологічну безпеку; він визначає порядок визнання, оцінки та класифікації витрат, а також включення інформації про них до фінансової звітності;

- Податковий кодекс України [11] - корегує витрати з метою визначення прибутку до оподаткування та податків;

- Національне положення (стандарт) бухгалтерського обліку 1 «Загальні вимоги до фінансової звітності» [12] - використовується на підприємстві для контролю правильності відображення інформації про витрати у фінансовій звітності та їх характеристики.

Вище вказані документи містять загальні положення щодо обліку витрат, але в них не виділяються окремо витрати на екологічну безпеку. Підприємства самостійно окреслюють особливості відображення витрат для забезпечення екологічної безпеки відповідно до інформаційних потреб управління і звітності.

До компетенцій сфери організації обліку відносять:

- 1) забезпечення внутрішньої впорядкованості та взаємоузгодженості об'єктів обліку (статичні характеристики облікового процесу);

- 2) налагодження процедур формування інформаційних ресурсів для задоволення потреб користувачів (динамічні характеристики облікового процесу).

Тобто, облік витрат на екологічну безпеку підприємства має бути організований таким чином, щоб найбільш якісно забезпечити інформацією осіб, які приймають рішення стосовно управління даними об'єктами облікового процесу і підприємства загалом. Зазначимо, що питання екологічної безпеки формують не лише оперативні й тактичні цілі господарювання, а й займають ключові позиції у стратегічному плануванні.

До витрат на забезпечення екологічної безпеки підприємства відносять:

- витрати на переробку й утилізацію відходів (налагодження системи їх збору, сортування, переробки);

- інвестиції в екологічні технології (модернізація обладнання та процесів, впровадження ресурсозберігаючих технологій та енергоефективних рішень, перехід на безвідходне виробництво);

- витрати на навчання персоналу та підвищення екологічної свідомості працівників;

- витрати на відновлення довкілля;

- затрати, пов'язані з регуляторними вимогами щодо екологічних питань (отримання міжнародних екологічних сертифікатів таких як ISO 14001 та інших екологічних нормативів, розробка екологічної документації);

- витрати на екологічний моніторинг (встановлення датчиків контролю, регулярний аналіз якості повітря, забруднення води, ґрунту тощо);

- витрати на екологічний аудит для виявлення потенційних загроз навколишньому середовищу, оцінки ефективності використання ресурсів і внутрішньої екологічної політики, аналізу відповідності законодавству, розробки рекомендацій щодо покращення екологічної стратегії.

Кожне підприємство має свій характерний для нього склад витрат на забезпечення екологічної безпеки, що залежить від господарської діяльності, якою займається суб'єкт господарювання. У рамках методології обліку витрат, важливою є їх чітка класифікація, яка

має бути затверджена наказом про облікову політику. Як і інші витрати, витрати на забезпечення екологічної безпеки класифікуються:

- за видами діяльності;
- за економічними елементами;
- за статтями калькуляції;
- за способом включення у собівартість;
- за функціональною роллю;
- за періодичністю виникнення;
- за центрами відповідальності.

Ретельно продумана та аргументована класифікація витрат на екологічну безпеку сприятиме раціональній організації їх обліку, що забезпечить точність визначення обсягів витрат і належний контроль за ефективністю використання ресурсів. Адже є велика різниця стосовно управління витратами із запобігання забрудненню і витратами з компенсації негативних наслідків забруднення і т.д. Актуальною вважаємо класифікацію, запропоновану І. Садовською [13]:

- за цільовим призначенням: на усунення причин забруднення, на усунення наслідків забруднення;
- за типом: капітальні, поточні;
- за календарними періодами: витрати минулих періодів, витрати звітного періоду, витрати майбутніх періодів;
- за напрямками здійснення: витрати на охорону повітря, витрати на охорону водних ресурсів, витрати на охорону ґрунтів та надр;
- за джерелами фінансування: включаються до собівартості продукції, здійснюються за рахунок прибутку, за рахунок бюджетних асигнувань, за рахунок позабюджетних цільових фондів;
- за сферою виникнення: внутрішні, зовнішні;
- за видом використовуваних ресурсів: трудові, матеріальні, фінансові.

Не менш важливим питанням обліку витрат на екологічну безпеку підприємства є організація їх документування та документообігу. Дані документи, як і будь які інші, повинні бути чітко структуровані, відповідати законодавству, забезпечувати прозорість для всіх зацікавлених сторін. Графік документообігу повинен містити терміни складання та обробки документів, перелік осіб, відповідальних за складання і подання документів. Для ефективного документообігу бажаною є цифровізація документів.

З метою забезпечення ефективності технології ведення обліку витрат на екологічну безпеку необхідно виділити в наказі про облікову політику наступні складові щодо витрат на екологічну безпеку:

- умови (критерії) визнання;
- методи оцінювання;
- рахунки (синтетичні, аналітичні), що будуть використовуватися для обліку;
- послідовність проходження документів та їх обробки;
- облікові реєстри, форми внутрішньої звітності та особливості відображення у фінансовій звітності;
- організація управлінського обліку та внутрішнього контролю.

Вище вказані пункти мають бути інтегровані в загальну систему обліково-аналітичного процесу з метою уникнення інформаційних повторів і накопичень.

План рахунків бухгалтерського обліку активів, капіталу, зобов'язань і господарських операцій підприємств і організацій [14] та в Інструкція про його застосування [15] не передбачають окремих рахунків чи субрахунків для обліку витрат на екологічну безпеку.

Для досягнення найбільшої якості інформативності обліку витрат на екологічну безпеку доцільно розробити і впровадити внутрішні стандарти їх управлінського обліку, які врахують всі інформаційні потреби менеджерів різних рівнів та забезпечать удосконалення процесу управління екологічною безпекою підприємства. Стандарти управлінського обліку

мають враховувати індивідуальну неповторність кожного підприємства та обраної ним стратегії розвитку.

Базовими принципами управлінського обліку є універсальність та гнучкість надання оперативної й достовірної інформації управлінцям для подальшого аналізу і здійснення управлінських дій щодо підвищення ефективності діяльності та досягнення стратегічних цілей [16, с. 63-68].

Структура номенклатури витрат на екологічну безпеку має відповідати чинній методиці обліку та завданням і функціям управління ними, повинна враховувати особливості функціонування кожного підприємства шляхом такого рівня деталізації і групування витрат, щоб уникнути зайвих непродуктивних обліково-аналітичних робіт в підсистемах фінансового та управлінського обліку.

Підприємствам, які займаються неекологічними видами діяльності, важливо серед ключових показників ефективності господарювання виокремити ключові показники екологічного значення, які формуватимуть розуміння про ефективність інвестицій чи економного використання ресурсів [17].

Для визначення рівня екологічної безпеки підприємства в наукових дослідженнях пропонуються різні абсолютні та відносні, часткові й узагальнюючі показники, зокрема:

1) показники екологічного навантаження, які характеризують кількість і склад забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне середовище, водні ресурси, земельні ресурси;

2) витрачання води, енергії, інших природних ресурсів на одиницю продукції;

3) показники щодо відходів та їх утилізації:

- частка відходів, що припадає на одиницю виробленої продукції;

- структура відходів (небезпечні, перероблювані, органічні);

- рівень переробки відходів;

4) скорочення енергоспоживання через модернізацію обладнання;

5) темпи впровадження заходів щодо усунення екологічних ризиків;

6) рівень виконання підприємством екологічних стандартів (ISO 14001, EMAS);

7) частота екологічних порушень (кількість штрафів, претензій або аварійних ситуацій, пов'язаних із екологічними питаннями) та витрати, які вони несуть;

8) показники екологічної відповідальності підприємства:

- кількість екологічних програм та ініціатив, впроваджених підприємством;

- частка витрат на екологічну модернізацію у загальному бюджеті підприємства;

- затрати на підвищення екологічної грамотності працівників;

- частка використання альтернативних джерел енергії (сонячної, вітрової, біоенергетики);

- вклад підприємства у розвиток місцевої екологічної інфраструктури;

9) прозорість підприємства в питаннях екології (публікація екологічних звітів, доступність інформації про екологічну політику тощо).

До показників, які характеризують ефективність витрат на екологічну безпеку підприємства відносять:

1) рентабельність екологічних інвестицій - співвідношення витрат на природоохоронні заходи до отриманих фінансових вигод (зменшення штрафів, підвищення конкурентоспроможності);

2) коефіцієнт ефективності екологічних витрат/інвестицій (рівень повернення вкладів) – співвідношення економічних вигод (зниження штрафів, економії ресурсів, зростання довіри інвесторів) до реальних екологічних витрат/інвестицій;

3) економічна ефективність утилізації/переробки - співвідношення економічної вигоди (економічного ефекту) до витрат на утилізацію/переробки. Економічний ефект формують показники зниження витрат на утилізацію/переробки, зменшення штрафних санкцій, доходи від утилізації/переробки;

4) економія витрат завдяки впровадження ефективних методів утилізації/переробки -

різниця між витратами до утилізації/переробки і після;

5) рентабельність утилізації/переробки - співвідношення прибутку, отриманого від утилізації/переробки до загальних витрат на неї;

6) економія на витратах за рахунок ресурсозбереження - зниження витрат на енергію, воду, матеріали після впровадження екологічних заходів;

7) чистий фінансовий ефект від витрат на екологічну безпеку - різниця між прибутком після вкладень в екологічну безпеку, прибутком до вкладень в екологічну безпеку та витратами на екологічну безпеку. Якщо значення цього показника більше від нуля, то здійснені витрати на екологічну безпеку сприяють підвищенню прибутковості;

8) вплив здійснених витрат на конкурентоспроможність - визначається як різниця між доходом з нових ринків (додатковий фінансовий результат, який підприємство отримує після виходу на нові екологічно орієнтовані ринки) і витратами на екологічну безпеку. Якщо результат позитивний, тобто доходи з нових ринків перевищують витрати на екологічну безпеку, то такі витрати є економічно оправданими і сприяють підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

Показники ефективності мають важливе значення для управління витратами на екологічну безпеку та допомагають:

- оптимізувати витрати;
- запобігти фінансовим ризикам;
- підвищити операційну ефективність (рівень економії енергії, води та матеріалів завдяки впровадженню екологічних заходів);
- прийняти рішення про інвестування в екологічну безпеку;
- оцінити конкурентні переваги завдяки витратам на екологічну безпеку;
- знайти можливості вдосконалення екологічної стратегії підприємства;
- мінімізувати негативний вплив на довкілля;
- отримати фінансові і стратегічні переваги.

Належним чином організований облік витрат на екологічну безпеку дозволяє підприємству ефективно управляти здійснюваними екологічними заходами та впровадженнями, максимально адаптувавши їх до потреб зовнішнього і внутрішнього середовища. В умовах військової агресії особливо актуальною є здатність швидкої адаптації бізнес-процесів до зміни обставин господарювання. Цьому сприяє діджиталізація обліку – перехід до цифрових технологій для управління, що дозволяє автоматизувати процеси, пришвидшити аналіз даних, одержувати інформацію в режимі реального часу, покращити контроль над витратами, зменшити ймовірність помилок, підвищити безпеку фінансових записів.

Як бачимо, облік, аналіз і контроль є головним інформаційним підґрунтям управління екологічною безпекою підприємства. Від правильно організованих обліково-аналітичних процедур залежить можливість своєчасного та об'єктивного врахування всіх екологічних аспектів господарювання, що забезпечує:

- врахування можливих ризиків;
- прийняття превентивних заходів;
- уникнення непередбачених і надмірних витрат;
- дотримання екологічної політики;
- збереження конкурентних переваг;
- неоціненний вклад у майбутнє суспільства.

Перспективними напрямками управління екологічною безпекою підприємства є:

- інноваційні впровадження;
- обмін досвідом у рамках міжнародної співпраці;
- впровадження системи екологічного менеджменту;
- підвищення екологічної свідомості;
- розробка програм післявоєнного відновлення інфраструктури та очищення територій.

1. Гавривлюк, А. В. (2011). Управління екологічними витратами. *Науковий вісник НЛТУ України*, 21(15), 96–99.
2. Давидюк, Т. (2009). *Екологічний, інтелектуальний та людський капітал в теорії бухгалтерського обліку: Монографія*. Житомир: ЖДТУ.
3. Замула, І. (2010). *Бухгалтерський облік екологічної діяльності у забезпеченні стійкого розвитку економіки: Монографія*. Житомир: ЖДТУ.
4. Колісник, О. П., & Гордієнко, Т. В. (2020). Облік екологічних витрат у системі управління підприємством в умовах сталого розвитку. *Modern Economics*, 19(2020), 69–75. [https://doi.org/10.31521/modecon.V19\(2020\)-12](https://doi.org/10.31521/modecon.V19(2020)-12)
5. Кондратюк, О. (2008). *Облік і аналіз екологічних витрат промислових підприємств* (Автореф. дис. ... канд. екон. наук, Київ).
6. Очеретько, М. Л., & Другакова, А. С. (2018). Удосконалення обліку витрат екологічної діяльності. *Економічна наука. Економіка та держава*, 1(2018), 50–54.
7. Пелиньо, Л. (2008). Місце екологічного обліку в сучасній системі бухгалтерського обліку та його важливе значення в сфері охорони довкілля. *Науковий вісник НЛТУ України*, 18(2), 70–75.
8. Совик, М. І. (2019). *Облік і контроль екологічних витрат* (Автореф. дис. ... канд. екон. наук, Київ).
9. Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні: Закон України від 16 липня 1999 р. № 996-XIV. Retrieved from <http://zakon.rada.gov.ua>.
10. Національне положення (стандарт) бухгалтерського обліку 16 «Витрати», наказ Міністерства фінансів України від 31 грудня 1999 року № 318. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0027-00#Text>.
11. Податковий кодекс України. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>.
12. Національне положення (стандарт) бухгалтерського обліку 1 «Загальні вимоги до фінансової звітності» від 07.02.2013. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0336-13>.
13. Садовська, І. Б. (2014). Класифікація екологічних витрат для цілей управлінського обліку. *Економічні науки. Серія «Облік і фінанси»*, (11), 223–234.
14. Міністерство фінансів України. (2011, December 9). *План рахунків бухгалтерського обліку активів, капіталу, зобов'язань і господарських операцій підприємств і організацій*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1557-11#Text>.
15. Міністерство фінансів України. (1999, November 30). *Інструкція про застосування Плану рахунків бухгалтерського обліку активів, капіталу, зобов'язань і господарських операцій підприємств і організацій*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0893-99#n946>.
16. Михайленко, О. В., & Майстренко, А. В. (2019). Розроблення та обґрунтування антикризової стратегії діяльності підприємства. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету*, 37, 63–68.
17. Маліков, В. В., Плекан, М. В., & Кудлаєва, Н. В. (2018). Екологічні аспекти бухобліку в управлінні підприємством. *Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича*. [https://doi.org/10.26642/pbo-2018-1\(39\)-94-99](https://doi.org/10.26642/pbo-2018-1(39)-94-99).

ВІДБУДОВА УКРАЇНИ: КРАЩІ ПРАКТИКИ ТА ВИКЛИКИ СЬОГОДЕННЯ

*«Минуле та сьогодення — наші кошти, тільки майбутнє — наша мета»
(Блез Паскаль (1623–1662) французький математик, фізик, літератор та філософ)*

Даценко Людмила

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ua-dln@ukr.net

Тітова Світлана

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

svtitova@ukr.net

Дубницька Маргарита

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

dubnytskamv@gmail.com

Проблеми відбудови країни та пов'язані з цим питання набувають актуальності в Україні, в контексті сталого розвитку та сталого землекористування. І вкрай гострими ці питання стали внаслідок повномасштабного вторгнення росії. Проведено аналіз досвіду відбудови країн світу, які зазнали воєнного впливу у різні часи та їх відновлення, з метою запровадження найкращих практик у відбудову нашої країни. Визначено кроки комплексного підходу щодо відбудови країни. Акцентовано увагу на тому, що процес євроінтеграції сприяє розбудові демократії та забезпечує верховенство права, що дозволить здійснити економічні реформи та покращити політичну стійкість України, удосконалити земельні відносини у системі управління земельними ресурсами в контексті раціонального землекористування, як сприятливої умови сталого розвитку в природно-ресурсній сфері.

Ключові слова: повоєнна відбудова, міжнародний досвід, комплексний підхід, сталий розвиток.

The problems of rebuilding the country and related issues are becoming increasingly relevant in Ukraine, in the context of sustainable development and sustainable land use. And these issues have become extremely acute as a result of russia's full-scale invasion. The author analyzes the experience of rebuilding countries that have been affected by military conflict at different times and their recovery in order to introduce best practices in the reconstruction of our country. The steps of a comprehensive approach to rebuilding the country are identified. It is emphasized that the process of European integration contributes to the development of democracy and ensures the rule of law, which will allow for economic reforms and improve the political stability of Ukraine, improve land relations in the land management system in the context of rational land use as a favorable condition for sustainable development in the natural resource sector.

Keywords: post-war reconstruction, international experience, integrated approach, sustainable development.

Вступ. Повномасштабне вторгнення з 24 лютого 2022 року ще більше загострило проблему деградації ґрунтів, а висока інтенсивність бойових дій на окремих ділянках поставила під сумнів безпечність використання земель, що безпосередньо постраждали від військового впливу [1]. Саме війна завдала шаленої шкоди нашим людям, нашій економіці і нашому довкіллю. І попереду нас чекає не менш складний шлях відновлення від завданих збитків. Та чи можливо, аби цей процес не просто повернув нас у довоєнний стан, а допоміг збудувати кращу країну, більш дружню для її людей та довкілля? Для того, щоб виграти боротьбу за післявоєнну реконструкцію та модернізацію країни доцільним є вивчення уроків минулих трагедій – війн та природних катаклізмів. Разом з тим, глобалізація економічних процесів, розширення регіональної інтеграції призводить до зростання антропогенного впливу на земельні ресурси та пошуку шляхів поліпшення середовища життєдіяльності, які на нашу думку, знаходяться у комплексному підході відбудови, що знаходиться у площині

просторового планування, як дієвого інструменту реалізації стратегічних цілей і завдань сталого (збалансованого) розвитку країни. Саме синергія та інтеграція всіх сфер господарської діяльності та управління дозволяє досягти економічної ефективності, соціального благополуччя та екологічної безпеки на конкретних територіях. Ці питання стають особливо гострими та актуальними в Україні в умовах воєнного стану. Війна росії проти України з 2014 року порушила ґрунтове середовище та спричинила широкомасштабну та довготривалу деградацію довкілля. На нашу думку, щоб якісно відбудувати Україну, потрібно буде врахувати наступні складові: безпека, фінансування, екологічність, інноваційність та енергоефективність споруд. Однак ми не перші, хто має пройти цей шлях — світ відбудовувався після Другої Світової та інших воєн. І з цього досвіду ми можемо винести для себе уроки, аби не повторити помилки інших країн.

Метою дослідження є узагальнення міжнародного досвіду щодо відновлення, реконструкції та модернізації країни із врахуванням досвіду країн, які зазнали воєнного впливу.

Постановка проблеми. Процес відновлення в нашій країні є сферою, яка потребує виваженої державної політики та використання дієвих форм і механізмів державного регулювання. Взагалі під державним регулюванням слід розуміти вплив держави на суб'єктів господарювання, спрямований на досягнення визначених цілей її економічної політики. Держава здійснює регулювання застосовуючи ряд механізмів, основними серед яких є: правовий, економічний та адміністративно-організаційний. Досліджуючи правовий механізм державного регулювання, зауважимо, що суб'єктом в ньому виступає законодавчий орган державної влади. Зміст правового методу регулювання полягає в розробленні нормативних правових актів, до яких належать закони, постанови, укази, інструкції, норми. Дотримання прийнятих законодавчих актів та відповідних до них нормативно-правових документів забезпечується загальними правовими нормами регулювання та встановленими юридичними критеріями відповідальності суб'єктів господарювання щодо за їх порушення.

Так, розглядаючи практику США, можна відмітити, що забруднені речовинами воєнно-техногенного походження землі знаходилися в підпорядкуванні Міністерства оборони, саме воно несло відповідальність за дії з їхнього відновлення, а також накладало обмеження на ці території щодо надання їх в оренду, поки дослідження не підтвердять можливість їх використання за призначенням. Водночас території колишнього воєнно-техногенного впливу, відповідність за використання яких несуть місцеві органи влади, могли самостійно ініціювати питання щодо їх відновлення. У підпорядкуванні Міністерства оборони США перебувало 1400 військових об'єктів загальною площею 10 млн акрів. Усвідомлюючи важливість військових об'єктів у збереженні біорізноманіття, США почали реабілітацію колишніх військових полігонів, щоб вони служили природними заповідниками. Відповідно до розробленого законодавства США відповідальний орган має розробити план землекористування. Для продажу або оренди землі певного типу використання Міністерство оборони зобов'язане виконати різні оцінки щодо ризиків ділянки, щоб визначити відповідні заходи з відновлення залежно від типу та рівня забруднення [2].

Забруднення речовинами воєнно-техногенного походження у Великій Британії є наслідком численних авіаційних ударів та використання різних систем озброєння з часів Другої світової війни. Це сприяло розробці політики, згідно з якою саме власники земель, а не військові займалися та відповідали за подолання наслідків забруднення. До того ж, місцеві органи влади часто працювали разом зі землевласниками та розділяли відповідальність за відновлення цих земель. Система управління повоєнними територіями Великої Британії покладала більше відповідальності на цивільних власників земель. Враховуючи цю регуляторну стратегію, уряд країни не надав окремих вказівок щодо управління цими територіями та не мав офіційних кількісних стандартів, щоб забезпечити еколого-геохімічну оцінку цих територій. Хоча Міністерство оборони Великої Британії не мало детальних вказівок щодо управління територіями, забрудненими воєнно-техногенними речовинами, воно мало регламентований підхід до кількісної оцінки ризиків, спричинених

забрудненню землі. Міністерство оборони використовувало оцінку якості землі, яка містить: дослідження ділянки на основі попередньої стратегічної оцінки та встановлення пріоритетів; польові та камеральні дослідження; детальні дослідження ділянок; оцінку варіантів та реакція місцевої влади. Попри розділену відповідальність за відновлення повоєнних територій між землевласниками та Міністерством оборони, не було розроблено методики, яка ефективно визначала б заходи з відновлення [3].

Більшість речовин воєнно-техногенного походження зосереджено на багатьох територіях Німеччини. Політика уряду щодо цих земель передбачала, що всі колишні військові полігони мають бути досліджені та потенційно відновлені, перш ніж їх можна буде використовувати в цивільних цілях. Покинуті військові об'єкти з 1991 року передали до власності уряду Німеччини, який відповідає за більшу частину забруднених земель. Зазвичай ці території не очищалися від нерозірваних боєприпасів, тож стан забруднення унаслідок мінувань для багатьох виведених з експлуатації полігонів недосліджений. Якщо уряд Німеччини продає землю для відновлення власникам, то саме вони стають відповідальними за відновлювані заходи. Військові об'єкти вважаються потенційно забрудненими, доки проведені дослідження не доведуть, що територія не становить небезпеку навколишньому середовищу та/або людям. У цьому випадку досліджувана територія підпадає під дію екологічних законів і стандартів німецької землі, в якій вона розташована. Наявні закони на національному рівні регулюють етапи відновлення забрудненої ділянки [4].

Перша світова війна суттєво змінила ґрунтово-рослинний покрив у Франції, де відбувалася основна частина бойових дій на західному фронті. Служба з відновлення Західної Фландрії є однією з перших організацій, що займалася питанням відновлення сільськогосподарських земель на пошкоджених територіях. Ця організація консультувала місцевих фермерів та допомагала відновлювати орні землі. Відновленням повоєнних територій частково займалися вітчизняні та іноземні некомерційні організації. Найвідомішим прикладом може служити Комітет зруйнованої Франції (*Comite Americain pour les Regions Devastees*), який сприяв не лише соціальній реконструкції села в Єні, а й роздавав посівне насіння та худобу. За десятиліття після закінчення війни вдалося відновити більшу частину колишньої прифронтової зони: ліси заново висаджені, сільськогосподарські угіддя повернуто в обробіток. Виняток становила «червона зона», що простягалася від Лілля на півночі Франції на південний захід від Нансі. Уряд Франції оголосив цю територію непридатною для проживання внаслідок хімічного забруднення та наявності боєприпасів, що не розірвалися. Це були райони, де вартість меліорації перевищила економічну вартість землі, тож перевагу надали лісонасадженням. Мета зонування (одна з складових просторового планування) поствоєнних територій полягала в оцінці можливостей їхнього відновлення до нормальної економічної активності. До критеріїв безпеки місць додалися економічні міркування: вартість окремих земель була надто низькою для «зачистки», враховуючи вартість робіт з розмінування. До 1919 р. Міністерство звільнених територій Франції розділило постраждалі території на три зони залежно від ступеня руйнування: «зелені зони», що мають мінімальні пошкодження; «жовті зони», що мають важкі, але обмежені пошкодження; «червоні зони», які зазвичай найближчі до колишніх ліній фронту та повністю знищені. «Зелена» та «жовта» зони порівняно рано були повернуті до цивільного користування. «Червоні» зони переважно мали високий відсоток порушень ландшафту. Ці зони очищувалися лише поверхнево, здебільшого їх просто консервували. Французька служба *Securite Civile*, яка відповідає за відновлення земель, вважає, що за нинішніми темпами може знадобитися до 700 років, аби повністю очистити всі залишки снарядів і гранат Першої світової війни із земель Франції [5].

На території колишньої республіки Югославії (Південно-Східна Європа) у період між 1991 та 2001 рр. відбувалася низка збройних конфліктів, що завдали значної шкоди навколишньому середовищу та призвели до забруднення поверхневих і підземних вод, ґрунту та повітря на Балканах понад 100 токсичними речовинами [5]. Одна зі значущих проблем післявоєнного відновлення охоплених війною країн полягала в інституційній

неспроможності, зокрема щодо вирішення екологічних проблем. Головна загроза полягала в тому, що системи управління навколишнім середовищем були настільки порушені, що це унеможливлювало належне подолання повоєнних екологічних проблем. На міжнародному рівні управління основними програмами допомоги Європейського Союзу в Республіці Сербія (включно з Косово), Республіці Чорногорія та Північній Македонії займалось Європейське агентство з реконструкції як основний орган ЄС з відновлення зруйнованого війною в зазначених країнах. Один із напрямів реалізації програм – навколишнє середовище, також екологічні питання вирішувались у межах секторів із розвитку сільської місцевості, водних об'єктів, інфраструктури. На рис. 1 та рис 2 представлено схему від будови країн, їх модернізація наукової та освітньої складової, по яких був проведений аналіз та визначено найважливіші рішення щодо їх відновлення після Другої світової війни.

Як показує проведений аналіз досвіду національної політики відновлення територій країнами світу, які постраждали від військових дій, відбудова повоєнних територій була пріоритетною складовою для їхнього безпечного розвитку. Однак існують наявні прогалини щодо нормативно встановлених вимог про відновлення земель, немає чіткого правового зобов'язання щодо ліквідації забруднення навколишнього середовища через бойові дії. Зусилля залишаються несистематичними та здійснюються окремо в кожному випадку. Безумовно, єдиного алгоритму відбудови не існує – кожна досліджена країна застосовувала власні стратегії. Звісно, не всі вони були успішними, проте певні рішення можуть стати підґрунтям для формування ефективного плану відновлення України.



Німеччина

жорстка фінансова дисципліна й супербалансований бюджет



Японія

план "Доджа", нова Конституція. демілітаризація військової промисловості, земельні реформи, демократизація праці, ліквідація *дзайбацу* (термін, який використовувався в Японській імперії для позначення конгломератів, чий вплив і розміри дозволяли контролювати значні частини японської економіки)



Італія

диференційований підхід у відновленні більш та менш постраждалих регіонів країни. Спеціальна політика для Півдня



Франція

приоритерізація відбудови за галузями промисловості на основі індикаційних показників



Польща

ефективне використання всіх доступних переваг від вступу в ЄС



Велика Британія

розумна забудова столиці та унормована політика будівництва нових міст



Країни Балтії

мала та велика приватизація, лібералізація економіки, дерегуляція для бізнесу, проста податкова система, адміністрування різних процесів завдяки діджиталізації

Рисунок 1. Досвід країн відновлення після Другої світової війни (авторська розробка)



Рисунок 2. Модернізація наукової та освітньої складової досліджуваних країн.

Сьогодні, органи місцевого самоврядування в Україні мають достатньо повноважень для того, щоб самостійно розробляти та впроваджувати програми відновлення та розвитку своїх громад. У той же час, цілий ряд питань, які способи імплементації таких програм, залежать від існуючого правового регулювання та управлінських рішень, що схвалюються на загальнодержавному рівні, соціально-економічної ситуації в країні, рівня децентралізації влади тощо. Важливим інструментом державного регулювання землекористування є зонування земель. Зонування земель за типами землекористування і категоріями визначає варіанти їх дозволеного використання. Зонування сільських територій має на меті захист земель від міської експансії, а також охорону довкілля. У багатьох розвинутих країнах не дозволяється нецільове використання земель сільськогосподарського призначення. Держава також може здійснювати регулювання землекористування шляхом встановлення правил здійснення угод, земельного планування та інших методів. Окремо варто зазначити, що в багатьох країнах держава може здійснювати пряме втручання на ринках землі, у багатьох із них існують спеціально створені інституції, які наділені правом купувати й продавати землі сільськогосподарського призначення, надавати пільги при продажі цих земель тощо [6].

З метою підвищення ефективності регулювання процесів землекористування значна частина країн Європейського Союзу вже здійснила автоматизацію своїх офіційних земельних інформаційних систем. Наслідком такої автоматизації стало те, що почав оброблятися і пересилатися в сферу електронної комерції розширена документація різного роду даних, що стосуються земель сільськогосподарського призначення. Постало питання вибору варіанту найкращого ведення форм облікових записів про землекористування, з використанням наявних інформаційних систем та технологій, що вимагає прийняття певних технічних та економічних рішень [7]. В Україні головним розпорядником великого обсягу інформації у сфері землекористування є Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру.

Що стосується розвитку сталого землекористування в Україні, то питання раціонального землекористування, охорони земельних ресурсів та впровадження екологічно-безпечних методів землекористування вже давно в центрі уваги представників урядового, бізнесового, наукового, освітянського, громадського середовища. *Пошук компромісів: Чи може Україна поєднати економічні, соціальні та екологічні потреби?* Хоча земельна реформа, яка триває в Україні, демонструє певний прогрес, зокрема, з точки зору сприяння економічному зростанню та збільшенню сільськогосподарського виробництва, стає все більш очевидним, що екологічні й соціальні аспекти відходять на другий план. Наприклад, з початком другого етапу відкриття ринку землі у 2024 році почав зростати попит на відносно безпечні території на заході України, де багато екологічно цінних територій, що орендуються великими компаніями, перетворюються на сільськогосподарські угіддя, що порушує природоохоронне законодавство.

Таким чином, удосконалення моніторингу дотримання екологічного законодавства України — критичне питання. Важливо, що цей контроль має бути ефективно організований

як на рівні держави, так і на рівні громади. Крім того, щоб краще збалансувати екологічні та сільськогосподарські питання, необхідно створити високоякісні дорадчі служби для громад, землевласників та орендарів. Однак просування реформ буде складним завданням через впливові аграрне лобі в Україні, яке має значну владу як на місцевому, так і на державному рівнях і ставить на перше місце економічну вигоду. Активні бойові дії та складний економічний стан ще більше посилює такі позиції. Цей вплив викликає занепокоєння, особливо враховуючи посилений контроль, який тепер мають великі підприємства, оскільки вони можуть не просто орендувати землю, а купувати її.

Загалом, хоча необхідність зміцнення економіки в умовах повномасштабного вторгнення не викликає сумнівів, державі важливо визнати виклики, пов'язані з неналежним дотриманням екологічних норм сільськогосподарськими підприємствами, а також наслідки концентрації земель як для довкілля, так і для громад. Для сталого відновлення України держава повинна балансувати між нагальною потребою підтримувати економічну діяльність і довгостроковими цілями збереження здорових екосистем і забезпечення справедливого розподілу землі.

На нашу думку [8, 9, 10], протидія викликам сталого та раціонального землекористування в Україні вимагає комплексного підходу, який включає наступні кроки, які представлено на рисунку 3.



Рисунок 3. Кроки комплексного підходу щодо сталого та раціонального землекористування в Україні (авторська розробка)

Після перемоги найважливішою потребою для населення стане відновлення житла, енергетичних об'єктів та інфраструктури. Проте, дослідження 16 країн, які відбудовувалися після війни, засвідчило, що краще *інвестувати в освіту, науку та технології*, бо це допоможе молодшому поколінню. *Європейська інтеграція* допомогла дослідженим країнам здійснити економічні реформи та покращити політичну стійкість. Процес євроінтеграції сприяє розбудові демократії та забезпечує верховенство права. Україні це також необхідно, аби позбутися радянського спадку. Також важливо розвивати технології, зокрема ІТ та креативні індустрії, які можуть мати позитивний вплив на економіку в майбутньому.

Україна щодня платить неймовірну ціну за нашу майбутню перемогу. І ми маємо переконатися, що країна, за яку українці та українки так завзято борються, буде відбудована прогресивною та комфортною для людей, що у ній мешкають і будуть повертатися. І здорове та збалансоване довкілля – це один із необхідних складників здорової країни.

Висновки.

1. *Використання найкращих технологій та практик.* Європейські стандарти, перевірені досвідом, які зобов'язують більш стало вести господарство. У політики ЄС вже понад 30 років включене поняття НДТМ (найкращі доступні технології та методи управління, або ж BAT – best available techniques) – це практики, які мають застосовувати підприємства, щоб зменшувати свій вплив на довкілля. Вони закріплені і в низці Директив, які Україна мала імплементувати в рамках євроінтеграції, і які стали ще більш актуальними із набуттям статусу кандидата ЄС. І саме вони мають застосовуватися і на підприємствах при їх відбудові, аби і зберігати довкілля, і покращувати ефективність самих підприємств. Наприклад, шведське підприємство мідної промисловості Rönnskär протягом 1998-2017 рр. пройшло через кілька етапів модернізації, щоб розширити виробництво у відповідності європейським стандартам. Воно не лише покращувало технології виробництва, а й, наприклад, підвищувало енергоефективність та впроваджувало технологію переробки електронного сміття, яка принесла їм додаткові дві тони золота та 32 тони срібла щороку. Врешті за цей період часу виробництво міді зросло на 43%, а викиди пилу в повітря впали на 52%. І загалом жодні з вимірюваних показників викидів у довкілля не перевищували дозволених. Крім того, будь-яка відбудова має відбуватися з врахуванням ресурсо- та енергоефективності та застосуванням природоорієнтованих рішень, а держава має зберігати та покращувати нагляд за дотриманням екологічних норм.

2. *Обирати сталість та системність, а не швидкість та тимчасовість.* Економічний розвиток – це важлива складова у частині розвитку будь-якої країни. Проте для комфортного та якісного життя українців та українок, нам необхідна не лише здорова економіка, а й здорове довкілля та суспільство.

3. *Забезпечити прозорість та участь громад у прийнятті рішень.* Громади самостійно й прозоро планують найкращі шляхи відновлення, враховуючи власні потреби й можливості, та залучаються до формування загальнодержавної стратегії відновлення. Вертикальне ухвалення рішень так само має корені ще в радянських підходах, коли громади на місцях мусили виконувати 5-річні плани, складені в центрі. Однак, такий тоталітарний підхід ніяк не сприяв доброту громад. В демократичній же країні врядування має бути прозорим та відкритим, аби громадяни могли брати участь у відбудові, контролювати цей процес і врешті відчувати відповідальність за ухвалені рішення. Наприклад, активна участь громадськості в ухваленні рішень та керуванні громадами вже почалася завдяки реформі децентралізації і навіть показала перші успіхи. Так одна з громад на Волині вирішила розвивати ягідництво, адже її унікальна територія має потенціал для цього, а місцеві вміють та хочуть працювати у цій сфері. Тепер у громаді повідомляють, що близько 20% населення працюють у цій сфері, молодь активніше повертається у громаду, а прибутки від оренди допомагають фінансувати дитсадки та центр дозвілля. Для активної участі громадян у відновленні, важливий також відкритий

доступ до інформації (публічних закупівель, реєстрів, даних з моніторингів в усіх сферах), а також адекватна робота систем правосуддя і боротьби із корупцією.

4. *Декарбонізувати та децентралізувати енергетику.* Пріоритет на розвиток безпечнішої та більш децентралізованої відновлюваної енергетики. Вугільна та атомна енергетика небезпечна для довкілля і в мирні часи, повномасштабна війна ж ще в рази підвищила ризики через можливе влучання в об'єкти їх інфраструктури. Нафтогазовий сектор так само є надзвичайно вразливим до низки кризових явищ (геополітичних, кліматичних тощо) та не є сталим рішенням для відновлення України. Тож відбудова енергетики має фокусуватися на відновлюваних джерелах енергії, які спричиняють значно менше шкоди довкіллю та людям. Такий перехід має супроводжувати підвищення енергоефективності та справедлива трансформація регіонів, що залежні від традиційної енергетики. Наприклад, данський острів Самсо ще у 1997 р вирішив стати енергонезалежним і перейшов на відновлювану енергетику. Він повністю забезпечує свої потреби енергією з вітряків, сонячних панелей та опалювальних станцій на біомасі і навіть може продавати надлишки. Більше того, багато місцевих мають частку у електростанціях, тож вони можуть не витратитися на енергію, а навпаки – заробляти на ній. Крім того, відновлювана енергетика у поєднанні з системами накопичення для виробництва електроенергії – більш стійке рішення для енергетичної безпеки. В системі, де є декілька великих джерел енергії, порушення в роботі одного з них позбавить світла одразу великі спільноти людей. Багато ж невеликих децентралізованих джерел можуть забезпечувати громади енергією навіть якщо деякі з них вийдуть з ладу – їх легше одразу замінити енергією з інших.

5. *Розвивати стійкі та децентралізовані агропродовольчі системи.* Підтримка та пріоритет надається малим та середнім локальним фермам. Масштабна агропромисловість шкодить довкіллю і через надмірне використання хімікатів, великі площі монокультур, надмірне розорювання, забруднення ґрунтів та води. Все це також посилює зміни клімату. Крім того, через довгі продовольчі ланцюги – тобто шлях від ферми до вашого столу – велике підприємство менш стає в кризові моменти. Адже порушення на хоча б одному етапі (наприклад, у постачанні) руйнує усю систему. В той час як малі та середні ферми мають більше можливостей впроваджувати більш екологічні практики та підтримують місцеві громади й економіки. Тож у відбудові цього сектору, підтримувати потрібно в першу чергу сталі та децентралізовані невеликі фермерські господарства. Наприклад, на початку повномасштабної війни Україна опинилася на порозі екологічної катастрофи через збої в роботі однієї з найбільших птахоферм Європи на Херсонщині. Через обстріли та відключення електрики на підприємстві не могли годувати курей та вивозити продукцію, тож мільйони курей виявилися під загрозою. Ситуації масової гибелі курей на великих фермах траплялися і раніше, загрожуючи людям і довкіллю масштабним забрудненням через мертву птицю. Малим же фермам значно легше підтримувати і себе, і громаду та уникати подібних ризиків. Так відбулося, наприклад, із господарством у Шостці, де під час облоги міста забезпечували свіжими овочами й зеленню місцевих. Крім того, важливо впроваджувати принципи циркулярної економіки як у тваринництві, так і рослинництві – наприклад, використовувати відходи як добриво чи біопаливо.

6. *Зберігати екосистеми та природне багатство України.* Природні території відновлюються та охороняються для підтримки екосистемних послуг зараз і у майбутньому. Вже зараз за попередніми підрахунками сотні об'єктів природоохоронного фонду України потерпають від бойових дій, обстрілів чи окупації. Тож необхідно сприймати довкілля не як ресурс, який можна експлуатувати для забудови, інтенсивного сільського господарства чи видобутку ресурсів, а як необхідну складову здорового та розвиненого суспільства. Наприклад, вже зараз відбудову починають використовувати недобросовісні забудовники. У звільненому Ірпені громада скаржиться, що під прикриттям відбудови в місті планують забудувати одну з небагатьох місцевих зелених зон – 8 гектарів лісу. Саме заплава річки Ірпінь та врятований від забудовників

Біличанський ліс став природним щитом столиці і допомагав ЗСУ боротися з ворогом і стримувати наступ на Київ. У мирний же час ліс – це необхідна складова міста для очищення повітря, адаптації до зміни клімату та комфортних прогулянок і відпочинку. Зокрема, для збереження екосистем, необхідно зберегти процедуру оцінки впливу на довкілля та належний контроль за виконанням екологічних норм, закріпити статус цінних територій Смарагдової мережі, сприяти виконанню лісової стратегії та стратегії з екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату. Окрім того, варто звернути увагу на надання охоронного статусу територіям забрудненим внаслідок воєнних дій. Ми маємо попіклуватися про те, щоб нинішні та майбутні покоління українців, як і наш унікальний рослинний та тваринний світ, були забезпечені чистою водою, землею та повітрям.

7. *Інституційна архітектура відбудови для України* є особливо важливим питанням. Досліджені країни використовували різні моделі для відновлення, які залежали від багатьох різних факторів – контекст, ресурси та рівень розвитку країни. Однак, кожна країна має свої особливості, тому однакові політики не завжди дають очікувані результати. Ми можемо розділити ці моделі на декілька складових: управління, фінансування та стратегію. Важливо вивчити кожен складову та її результативність, оскільки інституційна архітектура відбудови сформується в будь-якому випадку.

1. Третьяк А. М., Третьяк В. М., Курильців Р. М. та ін. (2021). Управління земельними ресурсами та землекористуванням: базові засади теорії, інституціоналізації, практики: монографія. Біла Церква: Білоцерківдрук. 227 с.

2. United States Environmental Protection Agency: Handbook on the management of munitions response actions: interim final. EPA 505-B-01-001. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2005. 208 p.

3. United Kingdom Ministry of Defense: Duty holders guide – guidance on the assessment and management of land contamination (IN 0708). London : Defense Estates, 2008. 164 p.

4. ‘Germany’: Investigation, Assessment, and Clean-up of Contaminated Military Sites / German Federal Environment Agency. 2007. 60 p.

5. Jentsch A., Silke F., Steinlein T. et al. (2009). Assessing Conservation Action for Substitution of Missing Dynamics on Former Military Training Areas in Central Europe. Restoration Ecology. Vol. 17. Iss. 1. P. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00339.x>

6. Jacobs F. In France’s Red Zones, World War I never ended. Strange Maps. 07.02.2021. URL: <https://big-think.com/strange-maps/zones-rouges/>

7. Коваль В., Вдовенко Н., Зось-Кіор М. (2023). Регулювання сільського розвитку для експорту органічної аграрної продукції в нових умовах розвитку міжнародної торгівлі та децентралізації. Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. Серія економічна. Серія юридична.. Вип. 38. С. 331–337. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8409867>

8. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M., Kustovska, O. (2024). The issue of sustainable land use in Ukraine taking into account the consequences of the war. Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus, 23(2), 25-38. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/185974>

9. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M. (2024). Conceptual approaches to the complex of restoration of the affected territories as a result of military actions in Ukraine. Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus, 23(3), 3-13. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/190126>

10. Dubnytska, M., Datsenko, L., Titova, S. (2023). Land and Legal Relations Reconstruction in the De-Occupied Territories of Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2023”, 1–5. DOI: [HYPERLINK "https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510115"](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510115) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510115>

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІОТ РІШЕНЬ ТА ML-МОДЕЛЕЙ

Казимира Ірина, Загвойський Ростислав, Омелюх Степан

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

iryna.y.kazymyra@lpnu.ua; rostyslav.y.zahvoiskyi@lpnu.ua; stepan.omeliukh.mknus.2023@lpnu.ua

Abstract. This study addresses the problem of automating plant cultivation monitoring in agronomy. The proposed approach integrates multisensor monitoring, computer vision, and dynamic microclimate control into a unified closed-loop system capable of adaptively responding to environmental changes in real time. An IoT-based platform for automated monitoring of vertical farms has been developed, with a prototype implemented using the ESP32-S3 microcontrollers. The system combines multisensor telemetry collection and computer vision (YOLO-v8) with on-chip inference latency of ≤ 250 ms. Secure data transmission is ensured, and the architecture is scalable to support up to 1,000 plants without modifying the code. Prototype testing demonstrated a 17% reduction in water usage, a 14% reduction in electricity consumption, and an 11% increase in biomass compared to manual control. The solution is affordable and suitable for small and medium-sized farms.

Keywords: vertical farming, IoT monitoring, machine learning (ML), ESP32-S3.

Анотація. У роботі розглядається проблема автоматизації моніторингу вирощування рослин в агрономії. Запропонований підхід передбачає інтеграцію мультисенсорного моніторингу, комп'ютерного зору і динамічного керування мікрокліматом у єдиний замкнений контур, здатний адаптивно реагувати на зміни середовища в режимі реального часу. Розроблено IoT-платформу автоматизованого моніторингу вертикальних ферм і реалізовано прототип з використанням ESP32-S3. Система об'єднує мультисенсорний збір телеметрії, комп'ютерний зір (YOLO-v8) з виведенням на самому чипі із затримкою ≤ 250 мс. Передбачено захищену передачу даних, архітектура масштабується до 1000 рослин без зміни коду. Тести прототипу підтвердили економію води й електроенергії на 17% та 14% і приріст біомаси на 11% порівняно з ручним контролем. Рішення є доступним для малих і середніх господарств.

Ключові слова: вертикальна ферма, IoT-моніторинг, машинне навчання, ESP32-S3.

Вступ. Постійне зростання населення Землі, що, за прогнозами FAO (Food and Agriculture Organization), до 2050 р. перевищить 9,7 млрд. осіб, радикально підвищує попит на продовольство [1]. Паралельно деградація ґрунтів, дефіцит прісної води та зростання енергетичних витрат ускладнюють розширення традиційних посівних площ [2]. Ці глобальні виклики активізують пошук високотехнологічних рішень, здатних забезпечити стабільну врожайність за умов обмежених ресурсів. Одним із найбільш перспективних напрямів сучасного агровиробництва є автоматизований моніторинг параметрів вирощування із застосуванням Інтернету речей (IoT), машинного навчання (ML) та комп'ютерного зору. Такі системи у режимі 24/7 збирають телеметричні та візуальні дані, оперативно виявляють аномалії й формують рекомендації щодо зрошення, живлення чи фітосанітарних заходів, мінімізуючи втрати врожаю [3].

Особливу увагу дослідників привертають вертикальні ферми – багаторусні закриті установки зі штучно керованим мікрокліматом, спроможні продукувати зелень і ягоди у безпосередній близькості до споживача. У такому контрольованому середовищі навіть незначні відхилення температури, рівня CO₂ чи спектра освітлення критично впливають на біомасу, тому точні сенсорні вимірювання та швидка корекція параметрів стають

вирішальними [2]. Відповідно головна мета проєкту полягає у створенні єдиного апаратно-програмного комплексу, здатного:

- Безперервно збирати високочастотні дані з мультисенсорних вузлів (відносна вологість, рН субстрату, зображення листкової поверхні);
- Аналізувати ці потоки даних за допомогою ML-моделей (YOLO для візуальних ознак) з урахуванням історії росту й зовнішніх факторів;
- Візуалізувати результати через масштабований веб/мобільний інтерфейс, інтегрований з хмарним сховищем даних [1].

Об'єктом дослідження обрано процеси моніторингу росту рослин у вертикальній фермі із застосуванням IoT-технологій; предметом – математичні моделі, апаратні та програмні засоби, що забезпечують автоматизовану обробку телеметричних і візуальних даних [4]. Запропонована система орієнтована на підвищення урожайності та якості продукції, оптимізацію споживання води, електроенергії та добрив і, зрештою, на зниження екологічного сліду виробництва.

Аналіз літературних джерел. Моніторинг вирощування рослин розвивався поступово: від простих візуальних оглядів до комплексних IoT-платформ, що інтегрують хмарну аналітику та машинне навчання. У літературі розрізняють п'ять основних груп технологій контролю: традиційні методи, сенсорні системи, інтелектуальні рішення, дистанційне зондування та IoT-платформи.

Найстаріший підхід – візуальний моніторинг, коли агрономи або техніки регулярно оглядають посіви з використанням біноклів, луп або й «неозброєного» ока [1]. Метод простий і дешевий, але результати залежать від досвіду спостерігача; огляд великих площ забирає час і не надає точних числових параметрів. Перехід до сенсорного моніторингу розширив коло вимірюваних параметрів: вологість і температура ґрунту, рН, електропровідність, вміст поживних елементів тощо. Сучасні дротові й бездротові давачі передають великі обсяги даних у майже реальному часі, що підвищує об'єктивність оцінки стану агроценозу. Утім для побудови масштабних мереж потрібні стабільні канали зв'язку та системи живлення, а інтеграція великої кількості датчиків підвищує вартість проєкту.

Обчислювальні методи, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки зображень і LSTM-мережі для часових рядів, дають змогу автоматично виявляти хвороби, прогнозувати потреби у воді та добривах і планувати врожайність. В оглядах [1, 3] зазначається, що точність таких моделей суттєво зростає при об'єднанні сенсорних і візуальних даних, але створення репрезентативних наборів навчальних даних залишається складним завданням.

Супутники та дрони дозволяють швидко охоплювати великі площі, формуючи індекси вегетації (NDVI, EVI тощо) чи теплові карти стресу. Недоліки: залежність від погодних умов і висока вартість високої просторової/спектральної роздільності. Найбільш комплексний підхід ґрунтується на мережах підключених пристроїв. IoT-системи збирають дані з безлічі сенсорів, інтегруються з хмарними сервісами й автоматизують прийняття рішень. Їм властиві масштабованість, модульність і можливість віддаленого налаштування, проте на ранньому етапі впровадження потрібні значні інвестиції у безпеку та обладнання [5].

Огляд джерел показує поступове ускладнення систем моніторингу: від суб'єктивного огляду до об'єктивного сенсорного й аналітичного контролю. IoT-рішення, що інтегрують мультимодальні дані та ML-алгоритми, мають найвищий потенціал підвищити врожайність, зменшити ресурсоемність і забезпечити своєчасне реагування на стрес-фактори. Однак ключовими викликами залишаються стартові витрати, кібербезпека та потреба у кваліфікованому персоналі для налаштування моделей і тлумачення результатів. Подальші дослідження спрямовані на зниження бар'єру входу: використання дешевших сенсорів, мереж низького енергоспоживання (LoRa, NB-IoT) та автоматизованих ML-платформ AutoML, що дозволять аграріям різного масштабу впроваджувати точний моніторинг без глибоких знань у науці про дані.

Огляд існуючих технологічних рішень.

CropX. Система складається з ґрунтових сенсорів, що заміряють вологість, температуру й солоність, а також хмарної платформи для аналізу та рекомендацій щодо поливу і добрив. Сильні сторони – простота встановлення і точність вимірювань; слабкі – висока ціна та відсутність моніторингу кліматичних умов чи здоров'я рослин.

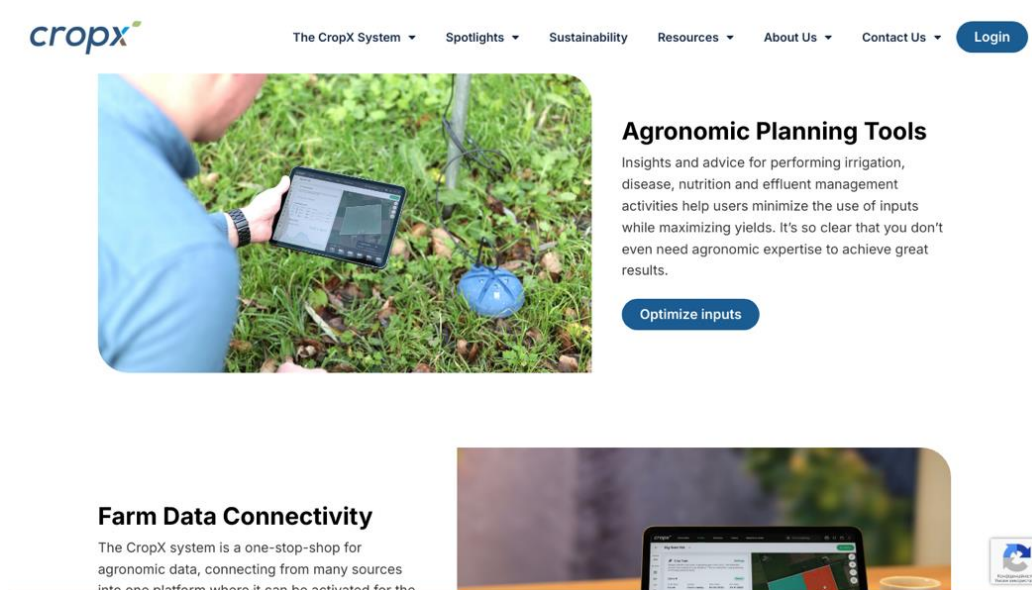


Рис. 1. IoT-система CropX [6]

John Deere FieldConnect. Призначена для контролю зрошення на великих фермах: давачі вологості передають дані у центральний модуль, що інтегрується з іншою технікою John Deere. До переваг системи слід зарахувати високу експлуатаційну надійність, можливість гнучкого масштабування під зростання виробничих потреб, а також повну сумісність із комплексами автоматизованої техніки. Водночас обтяжливими чинниками залишаються значні капітальні та операційні витрати, що фактично звужують сферу її впровадження до великих агропромислових господарств.

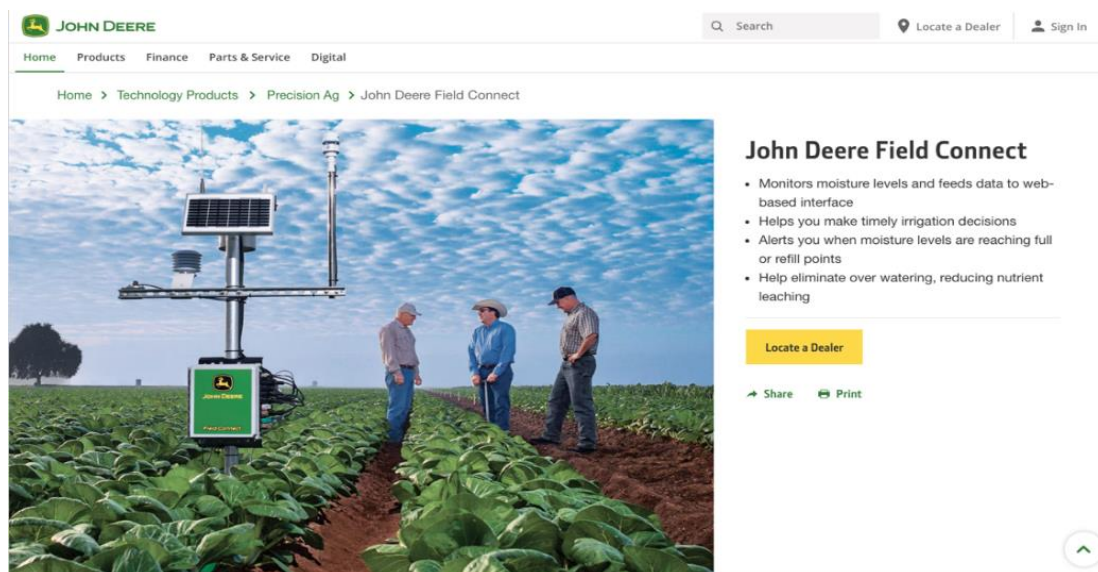


Рис. 2. IoT-система John Deere FieldConnect [7]

FarmBot. Роботизована платформа для малих ділянок, яка автоматизує посів, полив, прополювання й збір даних із сенсорів. Система адмініструється через інтуїтивно зрозумілий веб-інтерфейс і забезпечує безшовну інтеграцію з хмарними сервісами, полегшуючи централізоване управління та аналітичну обробку даних. Попри її повну операційну автономність як ключову перевагу, суттєвим обмежувальним чинником залишається надмірно висока вартість однієї інсталяції, що є непропорційною до площі фактичної обробки.

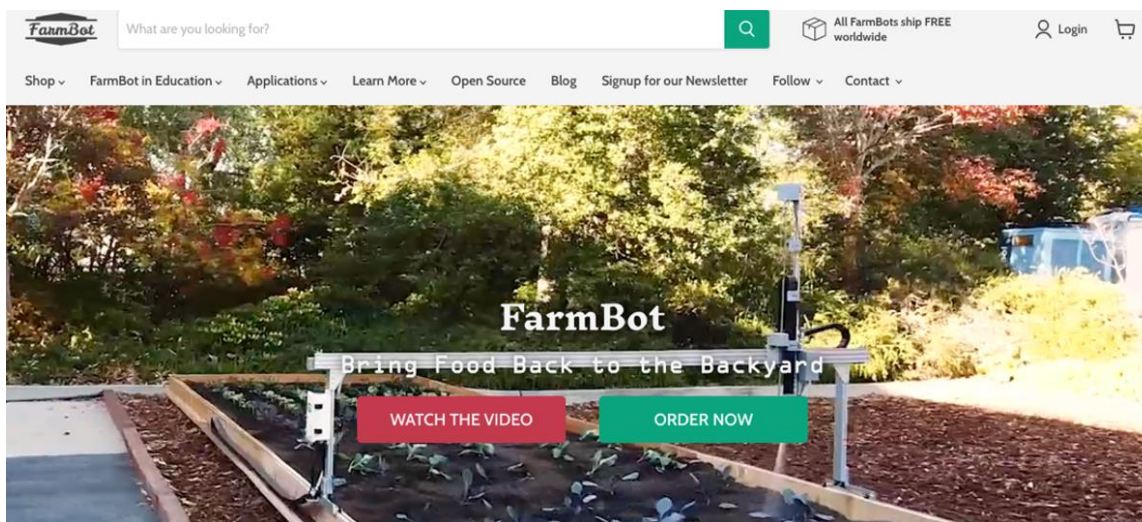


Рис. 3. IoT-система FarmBot [8]

AgriEye. Українська система, що поєднує супутникові та дроніві знімки з бездротовими сенсорами поля й хмарною аналітикою. Ключовою відмінністю цієї платформи є застосування алгоритмів штучного інтелекту, що прогнозують потреби рослин у воді та добривах і дають змогу оперативно ідентифікувати появу захворювань на ранніх стадіях. Завдяки цьому система оптимально задовольняє виробничі потреби середніх і великих агропідприємств, підвищуючи ефективність використання ресурсів та зменшуючи втрати врожаю. Водночас для повномасштабного розгортання необхідні стабільний канал інтернет-зв'язку та належна підготовка персоналу.

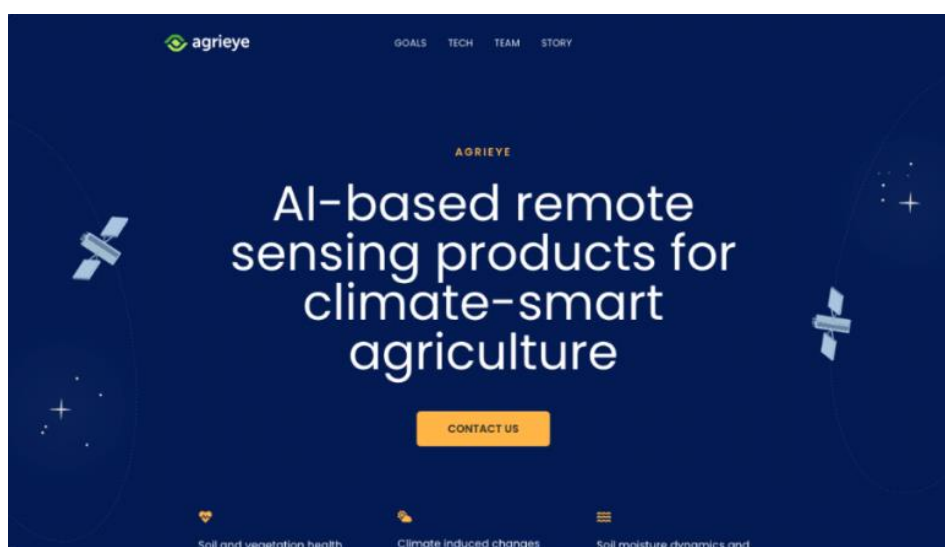


Рис. 4. IoT-система AgriEye [9]

Підсумок порівняльного аналізу розглянутих технологічних рішень для моніторингу вирощування рослин в агросфері подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз переваг і недоліків існуючих технологічних рішень у агрономії

Критерій	CropX	FieldConnect	FarmBot	AgriEye
Цільовий масштаб	середні	великі	малі	середні-великі
Набір сенсорів	грунтові	грунтові	грунт + клімат + зображення	грунт + дрон/супутник
Рівень автоматизації	рекомендації	рекомендації	повна роботизація	рекомендації
Початкові витрати	високі	дуже високі	дуже високі	середні
Основні переваги	точність, простота	інтеграція з технікою	автономія	мультимодальні дані
Основні недоліки	обмежений функціонал	не для дрібних ферм	мала площа, ціна	потреба у стійкому зв'язку

У загальному підсумку дослідження свідчать, що жодна окрема технологія не задовольняє повністю вимог сучасного точного землеробства. Комбінація сенсорних мереж із дистанційним зондуванням і edge аналітикою, підсиленою ML-моделями, забезпечує найкращий баланс між точністю, швидкістю реакції й економічною доцільністю. Системи, орієнтовані на великі господарства, демонструють високу продуктивність, але вимагають значного капіталу й спеціалізованого персоналу; натомість рішення для малих ферм мають лімітовану масштабованість.

Системний аналіз проблеми. Важливим етапом розроблення будь-якої автоматизованої інформаційної системи, особливо такої, що поєднує різноманітні технології, такі як Інтернет речей (IoT) і машинне навчання (ML), є проведення ретельного системного аналізу. Це дозволяє чітко сформулювати ключові проблеми, які має вирішити майбутня система, визначити необхідні цілі, а також структурувати вимоги до технічної реалізації. Для здійснення системного аналізу проблеми моніторингу вирощування рослин у вертикальних фермах було використано дві класичні методики: побудову «дерева проблем» і «дерева цілей». Ці методики дозволяють розглянути проблему комплексно, ідентифікувати взаємозв'язки між окремими складовими та сформулювати цілі, що слугують орієнтиром на етапах проєктування та реалізації системи.

Дерево проблем (рис. 5) наочно відображає основну проблему галузі, яка була визначена як неефективне управління процесом вирощування рослин у вертикальних фермах [10].



Рис. 5. Дерево проблем системи автоматизованого моніторингу вирощування рослин

Наслідками такої неефективності є низька врожайність і якість продукції, нераціональне використання ресурсів (води, добрив, енергії), зростання операційних витрат і негативний вплив на довкілля. Ці негативні прояви викликані рядом чинників, серед яких найбільш вагомими є недостатня точність моніторингу умов вирощування, слабе прогнозування потреб рослин і недостатній рівень автоматизації управлінських процесів. Як вторинні причини також визначено складність інтерфейсів існуючих рішень, що ускладнює роботу операторів та збільшує кількість помилок [10].

Аналіз існуючих рішень виявив, що більшість сучасних систем або недостатньо автоматизовані, або їхні сенсорні підсистеми не забезпечують повного набору необхідних параметрів для прийняття ефективних рішень у реальному часі [11]. Крім того, аналітичні моделі, що використовуються на практиці, здебільшого базуються на спрощених підходах, які не враховують повною мірою багатофакторні залежності між параметрами середовища та станом рослин [12].

Перехід від аналізу проблем до визначення шляхів їх вирішення реалізовано шляхом побудови дерева цілей, зображеного на рис. 6.

Ключовою стратегічною метою запропонованої системи є забезпечення високого та стабільного урожаю за умов раціонального використання ресурсів і мінімального негативного впливу на навколишнє середовище [10]. Ця мета розбивається на кілька цілей нижчого рівня:

1. Підвищення точності моніторингу умов вирощування шляхом застосування сучасних IoT-рішень, що дозволяють здійснювати вимірювання з високою точністю та частотою.
2. Зниження ресурсної інтенсивності процесу завдяки оптимізації використання води, електроенергії та поживних речовин шляхом інтеграції автоматизованих систем управління.
3. Скорочення операційних витрат через зменшення ручної праці персоналу за допомогою повної автоматизації процесів збору, обробки та інтерпретації даних.
4. Мінімізація екологічного навантаження, яка досягається зменшенням обсягів використання хімічних речовин і зниженням рівня відходів [5].

Для реалізації цих цілей визначені відповідні задачі, такі як інтеграція додаткових типів сенсорів (наприклад, сенсори рівня CO₂, pH-метри), впровадження розширених ML-моделей прогнозування, забезпечення автоматичного управління зрошенням і живленням рослин та створення зручного і зрозумілого інтерфейсу для користувача [13].



Рис. 6. Дерево цілей системи автоматизованого моніторингу вирощування рослин

Наступним кроком системного аналізу стало формування структурної моделі майбутньої системи моніторингу, що представлено на рис. 7. Ця модель відображає взаємодію ключових компонентів і основні інформаційні потоки між ними. Система складається з 3 основних рівнів:

1. Сенсорний рівень, на якому розташовані модулі збору первинної інформації: сенсори вологості, температури, pH, електропровідності, CO₂, а також камери для візуального аналізу рослин. Вибір сенсорів здійснено з урахуванням специфіки вертикальних ферм і рекомендацій попередніх досліджень [11, 14].
2. Контролерний рівень, представлений мікроконтролерами ESP32-S3 і ESP32-CAM, які забезпечують попередню обробку, компресію і передачу даних з сенсорів у систему зберігання та аналітики [14].
3. Рівень обробки і аналізу даних, де відбувається збір, обробка, збереження інформації, а також її аналіз і прогнозування. Цей рівень представлений програмними сервісами на основі Spring Boot, базами даних PostgreSQL та InfluxDB, і мультимодальними моделями машинного навчання, що дозволяють прогнозувати стан рослин та потреби у ресурсах з високою точністю [12, 15].

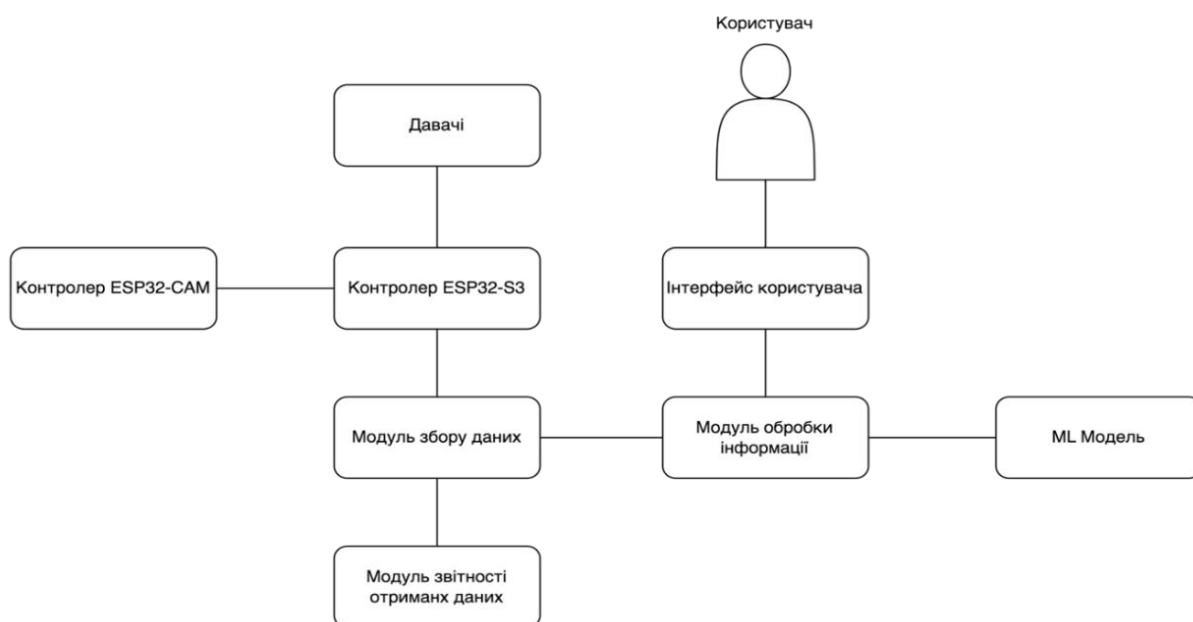


Рис. 7. Структура системи автоматизованого моніторингу вирощування рослин

Важливою складовою структурної моделі є інтерфейс користувача, який забезпечує оперативний доступ агрономів до інформації про стан рослин, дозволяє налаштовувати параметри системи, отримувати сповіщення про критичні ситуації і формувати звіти [12]. Для забезпечення надійності і оперативності взаємодії між компонентами системи застосовується спеціалізований протокол MQTT з підтримкою високого рівня надійності доставки (QoS 2), що особливо важливо при передачі критичних сповіщень [13].

Таким чином, проведений системний аналіз дозволяє чітко визначити ключові проблеми, які будуть вирішуватись за допомогою розроблюваної системи, поставити конкретні цілі для їх вирішення і окреслити технічні вимоги до реалізації. Наступними етапами після завершення цього аналізу є детальне проектування, побудова прототипу системи і її експериментальна апробація в умовах реальної вертикальної ферми. Це дозволить перевірити ефективність запропонованого рішення і визначити напрями подальших вдосконалень.

Вимоги до проектованої системи. Насамперед система повинна забезпечити безперервний мультисенсорний моніторинг параметрів середовища. Оскільки в умовах керованої гідропоніки навіть незначні коливання вологості чи рН можуть уповільнити ріст рослин, точність вимірювань прийнято не нижче $\pm 2\%$ для температурно-вологісних показників і $\pm 0,1$ рН для кислотності поживного розчину. Частота оцифрування рекомендована FAO для закритих тепличних комплексів становить одну вибірку в хвилину для мікроклімату та одну вибірку на пів години для хімічних компонентів [1]. Вибір датчиків базувався на рекомендаціях сучасних оглядів: DHT22 для температури й вологості, комбінований EC- та рН-зонд для електропровідності та кислотності, інфрачервоний CO₂-аналізатор, а також ультразвуковий рівнемір води для оперативного контролю заповнення баків [11].

Друга група вимог стосується візуального контролю. Практика показує, що раннє виявлення дисколорації чи плямистостей на листі економить до 20 % урожаю, адже патології локалізуються на початковій стадії [12]. Тому в систему інтегровано камеру на базі ESP32-CAM, здатну робити фотографії щонайменше двічі на добу з роздільністю 1,6 Мп. Щоб охопити весь стелаж, камера монтується на порталі з кроковими двигунами вертикального й горизонтального переміщення. Зображення стискаються у формат WebP, що дозволяє утримати середній розмір кадру в межах 200 кБ, після чого передаються до сервера попередньої обробки GreenTower Image Processor й зберігаються в об'єктному сховищі S3. Розроблену авторами схему апаратної частини системи представлено у [16].

Третій блок вимог – це інтелектуальна обробка даних. Для фотознімків обрано модель YOLO-v8, придатну до виконання на одноплатному комп'ютері без дискретного GPU. Під час лабораторних випробувань модель продемонструвала латентність близько 230 мс при класифікації одного кадру і середню абсолютну помилку 5 відсоткових пунктів у завданні визначення фази росту [12]. Для часових рядів застосовано двошарову мережу Bi-LSTM, що прогнозує вологість субстрату на шість годин наперед із середньоквадратичною помилкою 2,8 %. Ключовим принципом стало виконання першого кола виведення на рівні шлюзу ESP32-S3, аби мінімізувати затримку між виявленням аномалії та керувальною дією.

Автоматичне керування середовищем спирається на прості, але перевірені евристики. Коли значення рН виходить за межі 5,0–6,0, контролер дозує коригувальний розчин доти, доки показник не потрапить у діапазон 5,5–5,8 [5]. Поріг спрацьовування водяної станції обрано на рівні 25 %: після досягнення цієї позначки насос автоматично поповнює бак до 75 %. Система освітлення керується ШІМ-сигналом і працює за схемою «16 годин світла / 8 темряви» з динамічним коригуванням за індексом PAR, котрий обчислюється ML-модулем. Практичні експерименти засвідчили, що таке керування скорочує споживання електроенергії на 12–15 % без зниження продуктивності рослин.

Окремої уваги набула безпека та надійність. Оскільки ферма працює цілодобово, система повинна бути доступною щонайменше 99,5 % часу. Для цього критичні компоненти (брокер MQTT, база даних TimescaleDB і Spring-сервер) розгортаються у контейнерах Docker з автоматичним рестартом, а дані реплікуються на резервний твердотільний диск. Усі зовнішні з'єднання шифруються протоколом TLS 1.3, а найбільш важливі сповіщення (перегрів, критичні відхилення рН) передаються каналом MQTT з рівнем якості обслуговування QoS 2, що гарантує доставку [13]. Щоб ферма залишалася працездатною під час знеструмлення, енергоспоживання кожного ESP-вузла обмежено 200 мА, що дає змогу резервній батареї підтримувати мережу протягом щонайменше восьми годин.

Прототип та його випробування. Сформульовані вимоги дозволили чітко окреслити завдання прототипування. Суть його полягає в тому, щоб створити повністю інтегровану систему, яка обслуговуватиме до тисячі рослин, зменшить споживання води та електроенергії щонайменше на 15 % і забезпечить приріст біомаси принаймні на десять відсотків у порівнянні з ручним режимом. У рамках цього завдання необхідно, зокрема, сконструювати сенсорний вузол на ESP32-S3, розробити мікросервісну архітектуру GreenTower, навчити згадану CNN-модель на корпусі з п'яти тисяч аугментованих зображень рослин салату й

базиліку, а також спроектувати базу даних. Експериментальна перевірка ефективності має відбутися на полігоні площею двадцять на чотири метри протягом тридцяти днів.

В основі схеми системи, що об'єднує апаратні та програмні рівні (рис. 7), лежить тришарова модель. Найнижчий шар формують сенсорні модулі, які через шини I²C та UART передають дані контролерам. Середній шар – це шлюз на базі ESP32-S3 з контейнерами Mosquitto та Telegraf, котрий акумулює інформацію й здійснює первинний аналіз. Найвищий шар – хмарний: тут розгорнуто Spring Boot API, сховище InfluxDB/TimescaleDB, Image Processor та Model Processor. Веб-клієнт на React і мобільний застосунок на Flutter взаємодіють із сервером через WebSocket і GraphQL-енд-поінти, забезпечуючи агроному зручний доступ до дашбордів і історичних звітів.

Ключові інформаційні потоки пролягають уздовж чотирьох магістралей. Перша сполучає сенсори та контролери; друга – контролери й шлюз; третя – шлюз і хмарні сервіси; четверта – сервер і клієнтські додатки. Запити ML-модуля до Image Processor здійснюються асинхронно, що дозволяє не блокувати основний цикл моніторингу. Усі події типу alarm поширюються за допомогою брокера MQTT окремим топіком, що відділений від регулярних сенсорних повідомлень, завдяки чому критичні сигнали пріоритизуються мережевою апаратурою.

Алгоритмічне забезпечення прототипу складається з трьох головних процедур. Перша – алгоритм початкового калібрування, який підтверджує коректність показань сенсорів та положення камери після кожного перезапуску. Друга – цикл моніторингу, що формує послідовність дій від зчитування сенсорів до формування керувальних впливів. Третя – ML-pipeline, який реалізовано засобами GitHub Actions і містить етапи train – evaluate – export ONNX – deploy – update.

Чітке окреслення вимог у тісному зв'язку з детальною структурною схемою істотно знижує проєктні ризики, які можуть виникнути на наступних етапах інженерного циклу. Такий формат водночас задає однозначні межі функціональності, унеможливлюючи зміщення цілей і «розмивання» специфікацій. Разом із тим закладена модульність залишає простір для подальшого розширення, зокрема шляхом інтеграції додаткових сенсорів або перенесення виведення на периферійні TPU-модулі, що відкриває перспективи гнучкого масштабування. У результаті процес розроблення зберігає керованість, а вихідна система стає придатною як для надійної промислової експлуатації, так і для поглиблених наукових досліджень.

Основою пропонованого рішення стала тришарова архітектура. На сенсорному рівні встановлено вузли на базі ESP32-S3 та ESP32-CAM, які ще «на місці» виконують первинну фільтрацію й дедуплікацію, зменшуючи обсяг даних приблизно на 40 % порівняно з «сирою» телеметрією; такий підхід значно полегшує навантаження на мережу. Контролерний шар уособлює шлюз ESP32-S3: тут розгорнуто брокер MQTT і легковагі мікросервіси для передобробки сигналів, що забезпечує мінімальні затримки під час маршрутизації повідомлень. Нарешті, у хмарному шарі об'єднано Spring Boot API, часову базу даних TimescaleDB і ML-ядро; саме ця конфігурація дала змогу скоротити час формування критичних алертів до п'яти секунд – цільового порогу, визначеного під час початкового моделювання продуктивності [13].

Польові випробування проводилися на експериментальній ділянці 20×4 м і засвідчили економію води на 17%, електроенергії – на 14% порівняно з контрольним варіантом, а також приріст сухої біомаси на 11%. Додатково встановлено, що модель YOLO-v8 при інференсі безпосередньо на ESP32-S3 (без дискретного GPU) досягає F1-міри 0,92 на тестовому наборі з 1200 зображень, що підтверджує доцільність edge-обробки [12].

Висновки. Проведене дослідження довело, що синергійне використання IoT-технологій, edge аналітики і моделей машинного навчання істотно підвищує продуктивність вертикальних ферм, особливо в умовах, коли жорсткі просторові обмеження примушують агрономів уважно балансувати між інтенсивністю вирощування та економічною доцільністю. Під час системного аналізу було з'ясовано, що для сталого виробництва найкритичнішими залишаються три чинники: фрагментованість і неузгодженість первинних

даних, повільна реакція на стрес-фактори (перегрів, коливання рН, спалахи хвороб) та високі експлуатаційні витрати, які виникають через домінування ручних операцій [10]. Запропонована концепція усуває згадані обмеження, організовуючи багатоканальний збір телеметрії з похибкою не більш ніж $\pm 2\%$ для мікроклімату та $\pm 0,1$ рН для живильного розчину.

Наукова новизна полягає в інтеграції мультисенсорного моніторингу, комп'ютерного зору і динамічного керування мікрокліматом у єдиний замкнений контур, здатний адаптивно реагувати на зміни середовища в режимі реального часу. Практична цінність рішення підтверджується його масштабованістю: без зміни коду система підтримує до 1000 рослин, що робить її доступною не лише великим, а й малим та середнім фермам. Подальші роботи доцільно спрямувати на інтеграцію сенсорів іонів N^- та K^+ , запровадження повноцінного MLOps-циклу для безперервного оновлення моделей і тестування енергоощадних TPU-модулів, які потенційно зменшать латентність обробки та подальші витрати енергії [15].

1. Baibhav, V. (2023). *The internet of things in agriculture*. Agricultural Innovations and Technologies.
2. Bechar, A. (Ред.). (2021). *Innovation in agricultural robotics for precision agriculture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77036-5>
3. Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
4. Kose, U., Prasath, V. B. S., Mondal, M. R. H., Podder, P., & Bharati, S. (2022). *Artificial intelligence and smart agriculture technology*. Auerbach Publications. <https://doi.org/10.1201/9781003299059>
5. Roja, D., Venkatesh, N., Maheswari, S., Triveni, P., and Srikanth, C. (2024). Harnessing IoT for real-time plant health monitoring: Challenges and opportunities. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 10(02), 61–69. <https://doi.org/10.46501/ijmtst1002009>
6. *CropX agronomic farm management system* (2024). CropX Digital Agronomy Platform and Farm Management System. <https://cropx.com>
7. *John Deere Field Connect* (2024). Офіційний сайт John Deere Field Connect. <https://www.deere.africa/en/technology-products/>
8. *FarmBot. Open-Source CNC Farming* (2024). FarmBot. <https://farm.bot>
9. *AgriEYE* (2022). Офіційний сайт AgriEye. <https://agrieye.tech>
10. Qin, Z., & Karkee, M. (2021). *Fundamentals of agricultural and field robotics*. Springer International Publishing AG.
11. Richardson, C. (2018). *Microservices patterns*. Manning Publications.
12. +16Satapathy, S., Mishra, D., & Vargas, A. R. (2022). *Innovation in Agriculture with IoT and AI*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88828-2>
13. Sundravadivelu, K., Senthilvel, P. G., Thirupurasundari, D.R., Kumar, R. K., & Palani, H. K. (2023). Automated drone-based imaging systems for plant health monitoring using deep learning techniques. *2023 intelligent computing and control for engineering and business systems (ICCEBS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccebs58601.2023.10449190>
14. *ESP32 technical reference manual* (2020). Espressif Systems.
15. Zhang, Q. (Ред.). (2015). *Precision agriculture technology for crop farming*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19336>
16. Omelyukh, S. S., & Казумура, І. У. (2024). Програмно-апаратна реалізація системи моніторингу вирощування рослин. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. Int. Science-Practical Conf., October 23-25, 2024, Lviv, Ukraine*. <https://doi.org/10.36930/conf150.5.03>

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ: НА ПРИКЛАДІ БІОСФЕРНОГО РЕЗЕРВАТУ «РОЗТОЧЧЯ»

Карабчук Дмитро

Природний заповідник "Розточчя", ГО "ForestCom"

dmytro.karabchuk@forestcom.org.ua

Скольський Ігор

Природний заповідник "Розточчя", ГО "ForestCom"

ihor.skolskyu@forestcom.org.ua

Довбенко Володимир

NGO "ForestCom"

admin.deepforest@forestcom.org.ua

Анотація. У роботі представлено огляд основних методів цифрового моніторингу навколишнього середовища з використанням сучасних технологій дистанційного зондування. Проаналізовано наявні дослідження, присвячені виявленню змін лісового покриву на території Біосферного резервату «Розточчя», з метою забезпечення збереження та раціонального використання його природних ресурсів. Розглянуто різноманітні підходи до дистанційного моніторингу довкілля. Наголошено на тому, що застосування цифрових методів дистанційного моніторингу є дієвим та необхідним інструментом для сучасних досліджень динаміки лісового покриву, що водночас сприяє охороні унікальних екосистем та розвитку екологічної освіти. Підтверджено, що цифрові дані, аналітика та візуалізація змін лісового покриву дають змогу відстежувати тенденції, прогнозувати ризики та здійснювати контроль за відновленням лісів.

Ключові слова: дистанційний моніторинг Землі, супутники Sentinel-2, зміни лісового покриву, Global Forest Watch, Біосферний резерват «Розточчя».

Abstract. The article provides an overview of primary methods for digital environmental monitoring using modern remote sensing technologies. Existing research dedicated to detecting forest cover changes within the "Roztochya" Biosphere Reserve has been analyzed to ensure the conservation and rational use of its natural resources. Various approaches to remote environmental monitoring have been considered. It is emphasized that the application of digital remote monitoring methods is an effective and necessary tool for modern research on forest cover dynamics, which simultaneously contributes to the protection of unique ecosystems and the development of environmental education. It is confirmed that digital data, analytics, and visualization of forest cover changes enable the tracking of trends, the prediction of risks, and the control of forest restoration processes.

Keywords: Remote sensing, Sentinel-2 satellites, forest cover changes, Global Forest Watch, «Roztochya» Biosphere Reserve.

Вступ

Застосування сучасних ІТ-технологій (дрони, супутникові знімки, цифрові інтерактивні платформи) дозволяє забезпечити оперативний, інформативний і детальний моніторинг змін лісів: від оцінки площі покриву до аналізу біологічного різноманіття. У поєднанні з прогресом у програмному забезпеченні вони є цінним інструментом для інвентаризації та моніторингу навколишнього середовища.

Дистанційний моніторинг дозволяє за короткий час не використовуючи значні ресурси проводити огляд великих територій та отримувати доступні для постобробки дані, зокрема із застосуванням штучного інтелекту та нейронних мереж. Даний вид моніторингу дозволяє вести спостереження за великими площами довкілля для оцінки показників з високою достовірністю із подальшою їх обробкою. Така система моніторингу дозволяє

аналізувати законності зміни лісового покриву та його вплив на навколишнє середовище. Дистанційний цифровий моніторинг також є ключовим інструментом для дослідження змін лісового покриву, особливо в унікальних і вразливих лісових екосистемах, де обмежено фізичний доступ для збереження природного стану. Це дає можливість збирати дані без негативного антропогенного впливу.

1. Основні методи та платформи, які використовуються для дистанційного моніторингу за навколишнім середовищем

Метою дистанційного цифрового моніторингу є виявлення змін лісового покриву для збереження та раціонального використання природних ресурсів.

На даний час є багато різних методів для дистанційного моніторингу – від роботи індивідуальних супутників для стеження за довкіллям так і розробки різних платформ та дронів.

Застосування дистанційного моніторингу у дослідженнях стану навколишнього середовища має широке коло завдань, зокрема:

- налагодження системи автоматичного моніторингу за змінами лісового покриву на досліджуваних територіях;
- щомісячна оцінка втрат лісового покриву на територіях де знаходяться особливо цінні природоохоронні ліси та території (пралісів, квазіпралісів, природних лісів та інших цінних з біологічної точки зору природоохоронних територій);
- щорічна оцінка змін лісового покриву та інших природоохоронних територій;
- періодичне спостереження, залежно від погодних умов, пори року, рельєфу тощо на основі супутникових знімків за втратою лісів;
- попередня ідентифікація лісогосподарської діяльності на супутникових знімках;
- наземні спостереження за ситуацією на місцевості щодо вирубки лісів та інших змін лісового покриву, зокрема польові дослідження;
- повітряні спостереження з використання квадрокоптерів для створення ортофотопланів;
- картографування, уточнення та актуалізація існуючих карт;
- спостереження за змінами досліджуваних площ за допомогою порівняння отриманих у різний час знімків ортофотопланів;
- контроль за несанкціонованим будівництвом у природоохоронних зонах;
- планування робіт на земельних ділянках і їх розподіл на частини [1, 2].

У дослідженнях стану навколишнього середовища під час дистанційного моніторингу лісових екосистем супутникові дані відіграють важливу роль завдяки можливості отримання даних з висоти та використанню різноманітних сенсорів.

Усе більшої популярності для моніторингу за довкіллям набуває оптична супутникова зйомка. Це метод отримання зображень земної поверхні за допомогою супутників, які використовують прилади для вимірювання відбитого або випромінюваного світла у видимих, інфрачервоних та інших частинах електромагнітного спектру. Вони фіксують енергію, яка потім перетворюється в цифрове зображення. У цьому дослідженні ми використовуємо знімки із супутників Sentinel-2 (ESA), Landsat-8/9 (NASA/USGS), PlanetScope (Planet Labs) (табл.1).

Використання цих знімків дає можливість аналізувати стан лісів за різними спектральними каналами, зокрема оцінювати вегетаційні індекси (NDVI, EVI, NBR) для визначення здоров'я рослинності. Однак, такі знімки, як правило, покладаються на інформацію, яку несе сонячне світло, відбите від земної поверхні. Вночі або в умовах сильної хмарності вони не можуть збирати дані. Дані супутники також обладнані іншими приладами, які реєструють електромагнітне випромінювання в різних діапазонах (каналах). Кожен такий канал чутливий до певних характеристик поверхні (рослинність, вода, ґрунт). Роздільна здатність супутникового зображення визначає деталізацію, яку можна розрізнити

на знімку. Розрізняють просторову, спектральну, часову та радіометричну роздільну здатність.

Таблиця 1

Характеристики супутників для використання дистанційного моніторингу		
Назва супутника	Переваги	Застосування
Sentinel-2 (ESA)	- безкоштовні; - висока часова роздільна здатність; - періодичність 5 днів.	- моніторинг рослинності; - сільське господарство; - лісове господарство; - моніторинг водних ресурсів; - управління надзвичайними ситуаціями; - міське планування.
Landsat-8/9 (NASA/USGS)	- безкоштовні; - великий архів (з 1972 р.); - періодичність 16 днів.	- моніторинг землекористування; - лісове господарство; - сільське господарство; - геологія; - гідрологія; - зміна клімату.
PlanetScope (Planet Labs)	- обмежено безкоштовні (наприклад для вищих навчальних закладів для обмеженої території); - велика кількість малих супутників (Dove); - періодичність щоденна.	- лісове господарство; - сільське господарство; - моніторинг інфраструктури; - реагування на надзвичайні ситуації; - моніторинг лісозаготівель; - міське планування.

Оптична супутникова зйомка знайшла широке застосування у багатьох галузях, ставши цінним інструментом для отримання інформації про земну поверхню. У сільському господарстві вона дозволяє відстежувати стан посівів, прогнозувати врожайність, оптимізувати системи зрошення та вчасно виявляти захворювання рослин. Лісівники використовують ці дані для контролю за всиханням, вирубками, оцінки обсягів деревини та оперативного виявлення лісових пожеж. У сфері управління водними ресурсами знімки з супутників допомагають стежити за якістю води, оцінювати запаси водних об'єктів та попереджати про загрозу повеней.

Оптична зйомка з космосу стала незамінною для міського планування, надаючи можливість моніторингу розширення міст, аналізувати використання земель та ефективно управляти міською інфраструктурою. У випадках надзвичайних ситуацій супутникові знімки дозволяють оцінити масштаби руйнувань від стихійних лих, відслідковувати поширення пожеж та планувати пошуково-рятувальні операції.

Не менш важлива роль оптичної супутникової зйомки у вивченні зміни клімату. За допомогою неї спостерігають за таненням льодовиків, аналізують зміни у рослинному покриві та проводять аналіз землекористування, щоб зрозуміти наслідки зміни клімату. Геологи використовують знімки з супутників для картографування гірських порід, пошуку родовищ корисних копалин та моніторингу зсувів, допомагаючи таким чином у вивченні та охороні нашої планети.

Для дистанційного моніторингу доквілля можуть застосовуватися такі онлайн платформи і сервіси:

Google Earth Engine є платформою, розробленою для аналізу та обробки супутникових знімків, що забезпечує доступ до великої бібліотеки зображень і дозволяє моніторити зміни в лісових екосистемах і доквіллі, зокрема, відстежувати зміни

вегетатійних індексів, наприклад, NDVI. Ця платформа надає безкоштовний доступ для дослідників, екологів та урядових організацій.

Copernicus, європейська програма із супутниками Sentinel, надає безкоштовні дані для моніторингу змін на Землі, зокрема й лісових покривів. Ця програма широко застосовується для оцінки стану лісів та екологічних змін і дозволяє завантажувати супутникові знімки Sentinel для подальшої обробки.

Global Forest Watch – це платформа (глобальна інтерактивна карта), призначена для моніторингу змін у лісах, включно з виявленням незаконних рубок та лісових пожеж. Вона використовує супутникові дані для безперервного спостереження за лісами у глобальному масштабі, пропонуючи зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для користувачів з різним рівнем підготовки. Платформа забезпечує доступ до даних про вирубку лісів, лісові пожежі та інші зміни в режимі близькому до реального часу, а також використовує високоякісні супутникові знімки та інтегрується з іншими платформами для отримання точних результатів [3]. Однак, така платформа має у своїй базі щорічні результати втрат лісового покриву, що не дозволяє здійснювати щомісячний аналіз.

Для проведення якісного моніторингу території за допомогою космічних знімків щодо виявлення змін лісового покриву необхідно здійснювати відповідні роботи за певною послідовністю (рис.1):

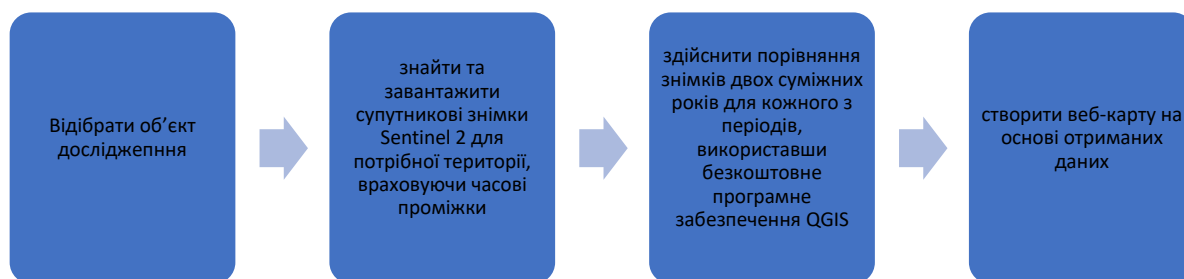


Рис. 1. Схема послідовності проведення дистанційного моніторингу довкілля

Для виявлення змін лісового покриву на незначних територіях дуже часто використовується алгоритм візуальної оцінки супутникових знімків, який застосовують підготовлені експерти. Обраний алгоритм базується на аналізі змін кольору, текстури та структури лісових масивів у певній часовій послідовності (рис.2).

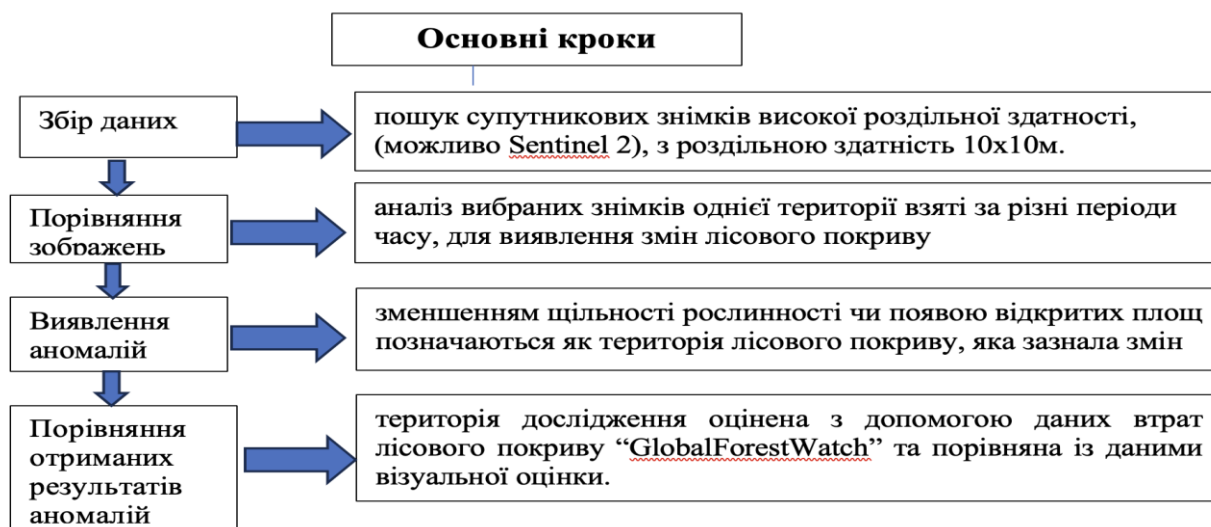


Рис. 2. Алгоритм для визначення змін лісового покриву

Алгоритм, хоч і надійний, але не автоматизований. Суб'єктивність є обмеженням даного методу, що залежить від кваліфікації аналітика. Несприятливі погодні умови, а саме тривала хмарність, ускладнюють процес інтерпретації. Відсутність можливості проведення точних вимірювань вимагає застосування додаткових індексів і проведення більшого аналізу.

Тому, ГО “Лісові ініціативи і суспільство” (ForestCom) у своїх дослідженнях зокрема у проєкті “Боротьба із незаконними рубками в Україні”, який підтримувався Лісовою службою США опрацював таку систему оцінки змін лісового покриву яка називається “Операторська експертна система моніторингу лісів”. Однак у ній “операторська” також може бути замінена напівавтоматичними і автоматичними процесами, залежно від можливостей застосування сучасних розробок програмного забезпечення у тому числі із використанням елементів “нейронних мереж” і штучного інтелекту. Такий інший підхід ГО ForestCom використано при створенні прототипу національної системи автоматичного дистанційного моніторингу законності зникнення лісового покриву в Україні (проєкт: “Deep Green Ukraine”, який був реалізований в межах проєкту міжнародної технічної допомоги USAID/UK aid у 2021-2022 роках).

2. Приклади моніторингу змін лісового покриву із використанням супутникових знімків Sentinel-2

У цій публікації, як приклад, розглянемо дослідження реалізоване у межах території Біосферного резервату «Розточчя». У результаті дослідження сформовано інтерактивну карту на якій зображено виявлені зміни лісового покриву (рис. 3).

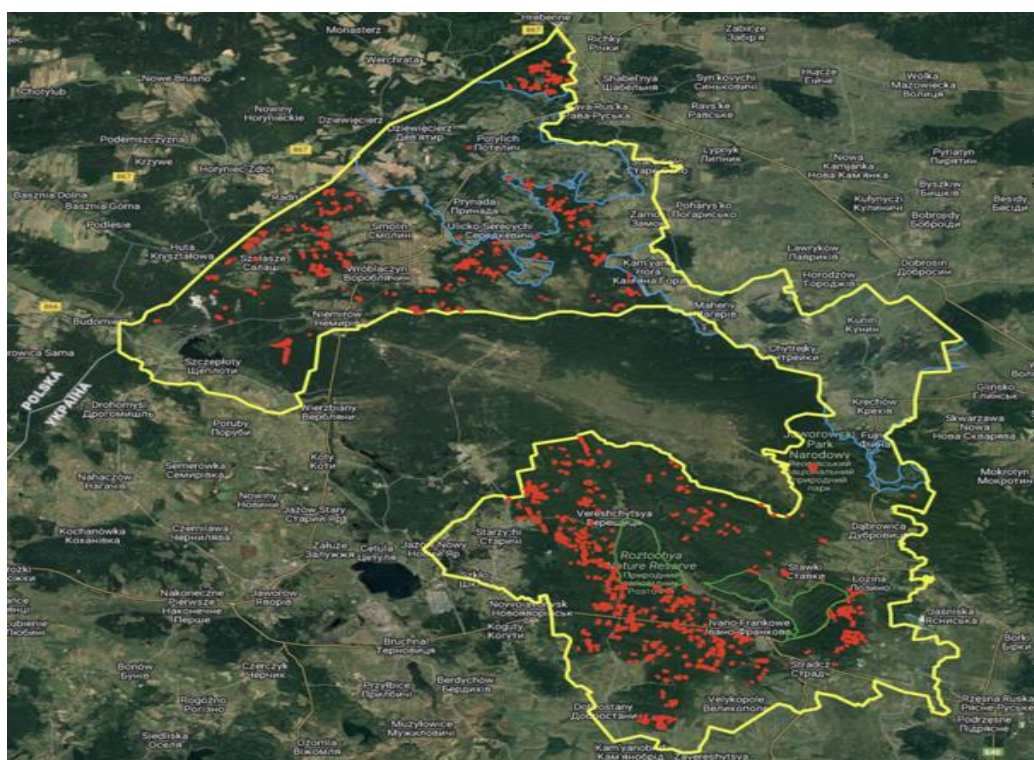


Рис. 3. Інтерактивна карта-схема території Біосферного резервату «Розточчя» з 11.08.2015 по 07.09.2024 р (жовта лінія – межі Резервату; синя лінія – РЛП «Равське Розточчя»; зелена лінія – Природний заповідник «Розточчя»)

Загалом лісистість біосферного резервату становить 47,1%, ліси переважають у всіх зонах – природних ядрах (90,7%), буферній (86,2%) та транзитній (37,2%) [4]. Природні ядра знаходяться в межах об'єктів природно-заповідного фонду України – в Природному заповіднику «Розточчя», Яворівському національному природному парку, заповіднику

урочищі «Немирів», регіональному ландшафтному парку «Равське Розточчя» де, відповідно до вимог МАБ ЮНЕСКО та чинного в Україні законодавства, не проводяться жодні рубки. На території транзитної та частково буферної зони біосферного резервату ведеться традиційне лісове господарство, тому дослідження зміни лісового покриву є актуальною задачею. Загальна територія біосферного резервату «Розточчя» складає 74828,0 га, з яких лише 2,8% розташовані в Природному заповіднику «Розточчя» [5].

На інтерактивній карті території Біосферного резервату «Розточчя» червоним кольором позначені межі ділянок, де зафіксовано зміни лісового покриву. Кожній території, що зазнала змін, присвоєно порядковий номер. Окрім цього, відображено площу ділянки та дати двох супутникових знімків, на основі яких було ідентифіковано зміни. В результаті було визначено територію, на якій виявлено зміни лісового покриву на всій території Біосферного резервату «Розточчя» (табл.2).

Таблиця 2

Зміни лісового покриву території БР «Розточчя» в різні часові періоди

Часовий проміжок (рік, місяць, день)	Кількість виявлених змін	Площа, га (приблизно)
2015.08.11 – 2016.09.14	114	108,5
2016.09.14 – 2017.08.10	92	98,8
2017.08.10 – 2018.08.20	101	91,3
2018.08.20 – 2019.08.20	158	122,0
2019.08.20 – 2020.09.23	127	71,3
2020.09.23 – 2021.07.30	151	84,3
2021.07.30 – 2022.06.25	124	88,2
2022.06.25 – 2023.08.29	101	69,703
2023.08.29 – 2024.09.07	98	60,655
Разом	1066	794,833

За результатами досліджень, змін лісового покриву в межах території Природного заповідника загальнодержавного значення «Розточчя» не виявлено (рис. 4). Просторово-картографічні результати змін за кожен часовий проміжок представлені на рис. 5.

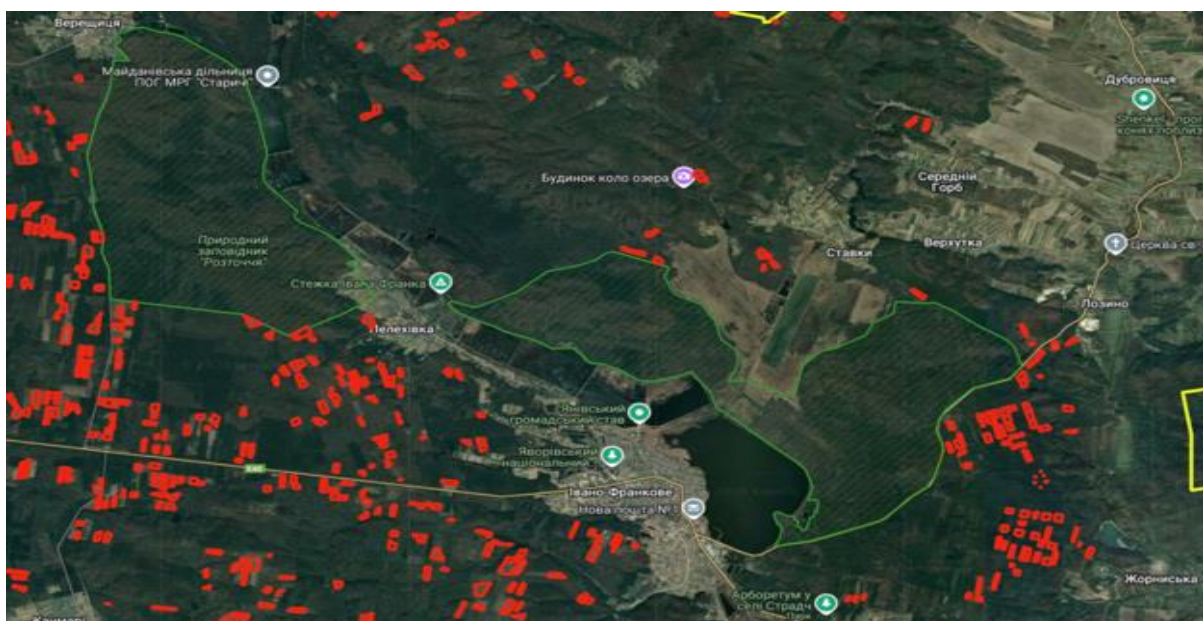


Рис.4. Інтерактивна карта-схема ПЗ «Розточчя» та суміжних територій із нанесенням змін лісового покриву

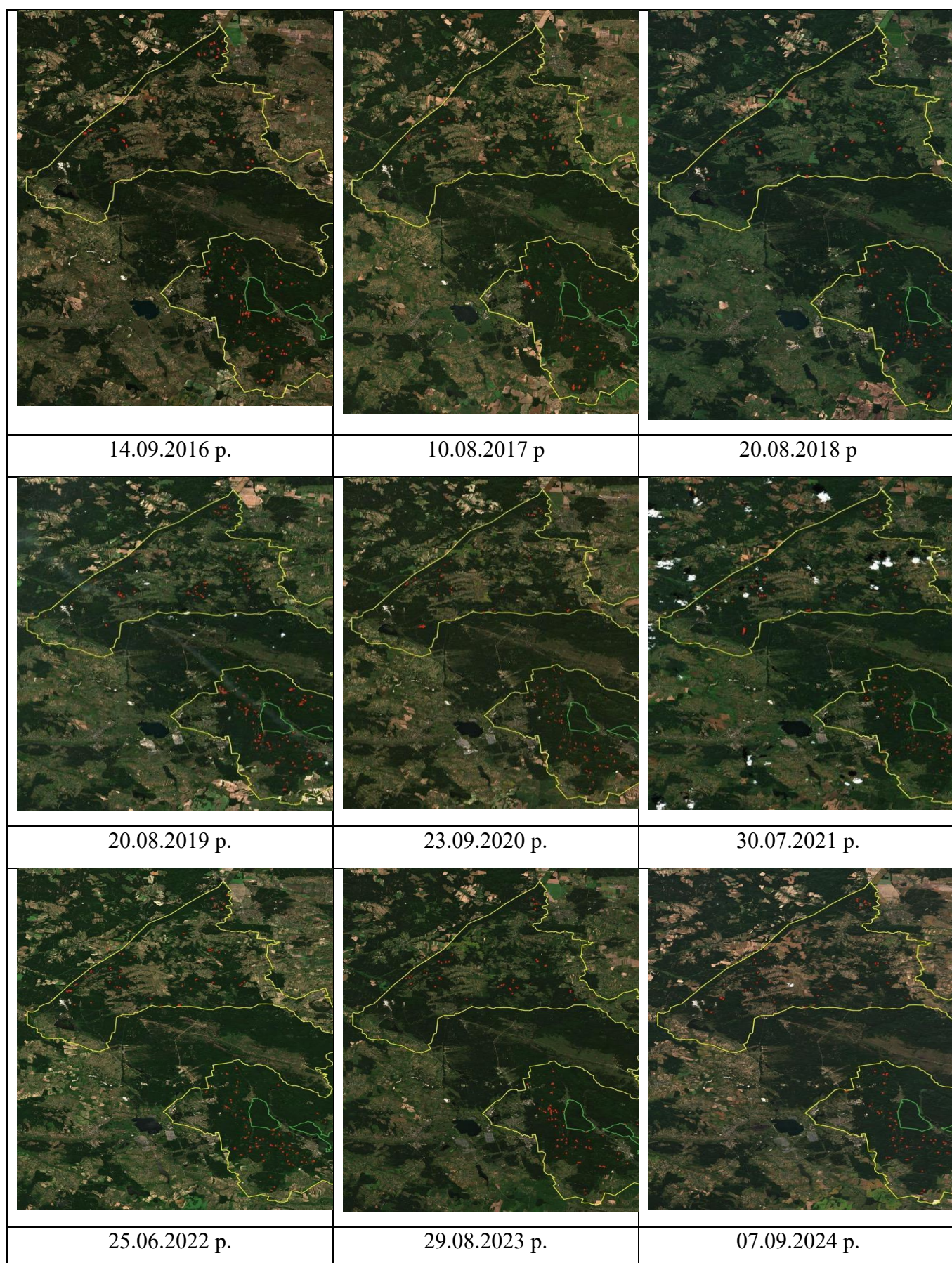


Рис. 5. Інтерактивна карта із накладеним знімком Sentinel-2 в різні періоди часу (2016-2024 рр.) Зауважимо, що серед причин змін лісового покриття варто віднести наступні біотичні та абіотичні фактори [6]:

- вирубка (законна та незаконна);
- всихання (через зміну клімату, хвороби, шкідників);
- вітровал (повалення дерев під дією сильного вітру);
- вітролом (часткове пошкодження крон і стовбурів дерев вітром);
- пожежі (природні або спричинені людською діяльністю);
- навали шкідників (коріод, листогризучі комахи);
- забруднення та кислотні дощі (вплив промислових викидів);
- зміна рівня ґрунтових вод (осушення чи підтоплення територій);
- будівництво інфраструктури (дороги, населені пункти, кар'єри);
- рекреаційне навантаження (надмірний туризм, витоупування).

Нами також здійснено альтернативний варіант дослідження, який базується на аналізі даних карт “Global Forest Watch” (<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/>), які містять інформацію про втрати лісового покриву та лісовідновлення з 2001 по 2023 рр. (рис. 6).

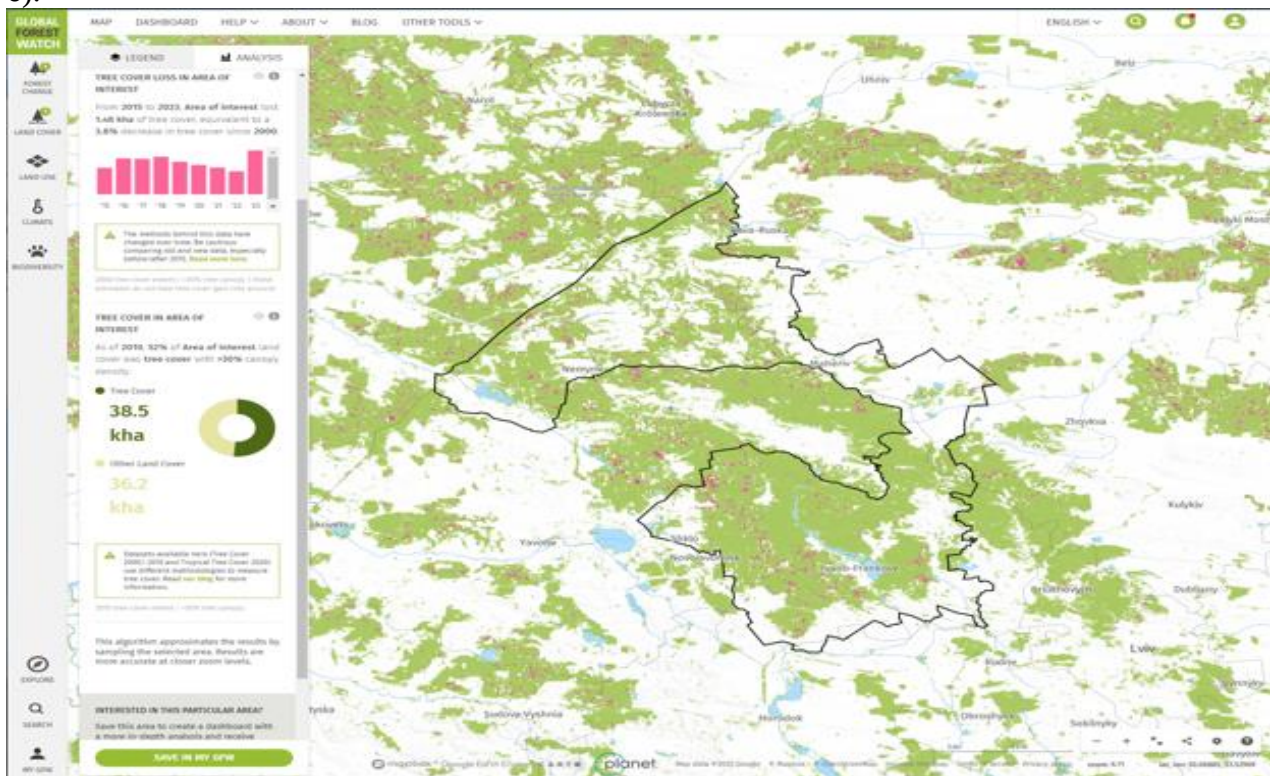


Рис. 6. Відображення лісового покриву з щільністю намету більше 30%, та втрат лісового покриву з щільністю намету більше 30% за даними Global Forest Watch за 2015-2023 роки

Щорічні втрати лісового покриву, залежно від щільності намету лісу за даними Global Forest Watch за 2015-2023 роки на території БР Розточчя відображено у табл. 3.

Як видно із дослідження, результати отримані за допомогою методу візуальної оцінки супутникових знімків, і аналіз даних з “Global Forest Watch” стосовно змін лісового покриву на території Біосферного резервату «Розточчя» є різними. Так, зміни зафіксовані на супутникових знімках Сентіinel 2 становлять лише 795 гектарів у той час, як дані з “Global Forest Watch” вказують на 1476 гектари втраченого лісового покриву (при щільності намету >30%) за досліджуваний період, що на 681 гектарів більше. Така значна різниця може бути пояснена наступними чинниками:

Таблиця 3

Щорічні втрати лісового покриву, залежно від щільності намету лісу за даними Global Forest Watch за 2015-2023 роки на території БР Розточчя

Рік	Втрати дер. покриву при щільності намету >30%, га	Втрати дер. покриву при щільності намету >75%, га
2015	134	106
2016	182	136
2017	180	138
2018	191	143
2019	165	130
2020	149	102
2021	136	96
2022	116	89
2023	223	152
Разом	1476	1092

- для оцінки втрат лісового покриву за картами “Global Forest Watch” використовує означення «лісовий покрив» як вся рослинність висотою понад 5 метрів, яка може мати форму природних лісів або насаджень у різних типах із зімкнутістю крон понад 30% [7], що може значно відрізнятися від інтерпретації «лісовий покрив» застосованої під час візуальної оцінки знімків Sentinel 2;

- додатковим фактором є різниця у роздільній здатності знімків використаних для оцінки змін лісового покриву, так – “Global Forest Watch” використовує здебільшого карти Landsat із роздільною здатністю 30x30 метрів [8], що при ідентифікації втрат лісового покриву менших розмірів може призводити до збільшення виявлених територій та накопичення помилок.

- важливим фактором є часовий проміжок дослідження, адже для візуальної оцінки взято знімки від 11 серпня 2015 року та завершено оцінювання знімком від 07 вересня 2024 року, натомість дослідження “Global Forest Watch” здійснено на період цілих календарних років.

Варто зазначити, що на нашу думку, метод візуальної оцінки є точнішим і може бути корисним для виявлення очевидних змін, однак його суб'єктивність і обмеженість в часі можуть призвести до пропуску важливої інформації. У той же час дані з “Global Forest Watch” пропонують стандартизований підхід з доступом до ширшої бази даних про лісові зміни, що дозволяє оцінювати динаміку лісового покриву незалежно від суб'єктивних оцінок дослідника і служить важливим незалежним інструментом для екологічного моніторингу.

Однак більша роздільна здатність використаних супутникових знімків та відмінність у інтерпретації визначення “лісовий покрив” можуть призвести до значних відхилень у розумінні та інтерпретації предмету досліджень у кожному окремому випадку. Натомість, об'єднуючи обидва підходи, можна отримати більш повну картину змін лісового покриву, що має важливе значення для подальшого управління природними ресурсами і охорони

навколишнього середовища [9]. Тим не менше, польові дослідження можуть прояснити виявлені розбіжності більш детально.

Висновок

Дослідження змін лісового покриву на території БР «Розточчя» підтвердило ефективність використання супутникових знімків Sentinel-2 та безкоштовного програмного забезпечення QGIS для аналізу і візуалізації екологічних змін. Використаний метод візуальної оцінки, що базується на аналізі кольору, текстури та структури лісових масивів, дозволив виявити значні зміни покриву протягом досліджуваного періоду з 11 серпня 2015 року по 7 вересня 2024 року.

Результати дослідження показали, що в межах території Природного заповідника «Розточчя» значних змін лісового покриву не зафіксовано, хоча в околицях були виявлені аномалії, пов'язані із можливими факторами, такими як вирубка, всихання, пожежі та інші шкідливі впливи. Це свідчить про те, що природний заповідник залишається дієвим бар'єром для негативних екологічних процесів, проте потребує подальшого моніторингу та захисту.

На основі отриманих даних була створена інтерактивна карта, що відображає виявлені зміни лісового покриву, що залишає можливості для подальшого аналізу і використання цих даних в екологічних дослідженнях і плануванні. Пропонується також розглянути можливість використання альтернативних джерел даних, таких як “Global Forest Watch”, для більш детального аналізу втрат лісового покриву за останні роки.

У майбутніх дослідженнях важливо зосередитися на польових дослідженнях із визначенням конкретних драйверів змін для кожної ділянки окремо, що дозволить точніше зрозуміти динаміку лісових екосистем і забезпечити їх збереження.

1. Лабораторія моніторингу лісів <https://forestcom.org.ua/laboratory/laboratoriya-monitoringu-lisiv>
2. Коржов В.Л., Кудра В.С., Часковський О.Г., Скольський І.М. (2022, жовтень 20) Застосування методів дистанційного зондування Землі в практиці наукових досліджень. Ліси в умовах сучасних викликів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і здобувачів, 83–85 с. https://uriffm.org.ua/media/uploads/2022/10/21/tezy2022_uriffm_AhV8GID.pdf
3. Global Forest Watch. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global>
4. Стрямець Г., Бовт Я., Ференц Н. (2013) Роль біосферного резервату "Розточчя" у збереженні біорізноманіття регіону. Вісник Львівського університету. Вип. 63. С. 13-19. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VLNU_biol_2013_63_4
5. Брусак В.П., Зінько Ю.В., Кричевська Д.А., Данчук О.Т., Криницький Г.Т., Стрямець Г.В., Майданський М.А. (2007) Просторова структура і функціональне зонування української частини проектного біосферного резервату “Розточчя”. Вісник Львівського університету. Серія географічна. Вип.34. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені І. Франка,. - 19-30 с
6. Часковський О. Г., Карабчук Д. Ю., Іванюк А. П. (2019). Зміни лісового вкриття Українських Карпат за період 1984–2016 років. Науковий вісник НЛТУ України., т. 29, № 2. С. 9–14. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2019_29_2_3
7. Mazur, E., M. Sims, E. Goldman, M. Schneider, F. Stolle, M. DaldossPirri, and C.R. Beatty. (2023). “SBTN NaturalLandsMap”.
8. Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. (15 November 2013). “High-ResolutionGlobalMapsof 21st-Century ForestCoverChange.” Science 342 (): 850–53. Data available from: earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest.
9. Літопис природи /Природний заповідник «Розточчя» (2024). с-ще Івано-Франкове. Кн.7 – 38.

PYTHON ЯК ЗАСІБ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Кобильник Тарас
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
taras.p.kobylnyk@lpnu.ua

The article is devoted to the use of the SciPy and PuLP modules of the Python language for researching and solving linear programming problems. As a programming environment, we used Google Colab, a web service from Google that allows users to write and execute Python code in a browser. In addition, Google Colab provides free access to computing resources. The article analyzes the graphical method for solving a linear programming problem, the integer linear programming problem, and the traveling salesman problem. To solve the above problems, we used the SciPy and PuLP modules. It should be noted that SciPy does not have built-in support for integer linear programming problems. Therefore, for such problems and the traveling salesman problem, we used the PuLP model.

Key words: linear programming; traveling salesman problem; integer linear programming; Python language.

Стаття присвячена використанню модулів SciPy та PuLP мови Python для дослідження та розв'язування задач лінійного програмування. Як середовище програмування ми використовували Google Colab – вебсервіс від Google, який надає можливість користувачам писати та виконувати код Python у браузері. Крім того, Google Colab надає безкоштовний доступ до обчислювальних ресурсів. У статті аналізуються графічний метод розв'язування задачі лінійного програмування, задача цілочисельного лінійного програмування та задача комівояжера. Для розв'язування названих задач ми використовували модулі SciPy та PuLP. Зазначимо, SciPy не має вбудованої підтримки для задач цілочисельного лінійного програмування. Тому для таких задач та задачі комівояжера ми використовували модель PuLP.

Ключові слова: лінійне програмування; задача комівояжера; цілочисельне лінійне програмування; мова Python.

Значну частину інтелектуальних задач можна звести до задач математичного програмування, особливе місце серед яких займає лінійне програмування, моделі якого використовуються всюди, де потрібно віднайти якнайкраще рішення за певних умов. .

Алгоритми лінійного програмування є в основі інших оптимізаційних задач, більш складних типів моделей і задач дослідження операцій, включаючи цілочисельне, нелінійне та стохастичне програмування. Обчислення в алгоритмах лінійного програмування є трудомісткими, тому доцільним є використання відповідних програмних засобів, табличних процесорів, систем комп'ютерної математики, спеціалізованих програмного забезпечення, інструментальних мов програмування.

Ми рекомендуємо застосовувати мову Python разом з відповідними модулями SciPy та PuLP. Як середовище програмування пропонуємо Google Colab **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**.

Для розв'язування задач лінійного програмування використовують різні програмні засоби як загального призначення, так і спеціального. Так, автори **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]** для дослідження задачі комівояжера надбудову «Розв'язувач» табличного процесора MS Excel. Такий же програмний засіб застосовують для розв'язування задачі цілочислового лінійного програмування з обмеженнями у вигляді нерівностей та булевими змінними **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**. У роботі **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]** проведено огляд систем комп'ютерної математики, у яких

реалізовано методи оптимізації для застосування до розв'язання оптимізаційних задач різних класів та доцільність використання в навчальному процесі.

У дослідженні [Помилка! Джерело посилання не знайдено.] автор аналізує, як розв'язувати задачі лінійного програмування за допомогою модуля SciPy. Як приклад практичного використання розглядається задача обчислення чебишевського центру множини.

Використанням модуля PuLP дозволяє описувати математичні моделі, в тому числі і лінійного програмування, мовою програмування і дозволяє користувачеві писати програмний код, використовуючи вирази, які є звичними для мови Python, уникаючи спеціального синтаксису [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Під задачею лінійного програмування розуміють оптимізаційну задачу, завданням якої є відшукування найкращого (найменшого або найбільшого) значення лінійної функції кількох змінних (цільової функції) за наявності лінійних обмежень. Відповідно для побудови моделі задачі лінійного необхідно визначити:

1. **Змінні: визначення змінних – перший крок у побудові моделі задачі лінійного програмування;**
2. **Цільову функцію:** Лінійна функція кількох змінних, для якої треба відшукати екстремум (максимум або мінімум залежно від змісту задачі).
3. **Обмеження:** Набір лінійних нерівностей або рівнянь, за якими визначають допустиму область, з якої можуть набувати значення змінні.

У загальному випадку постановка задачі лінійного програмування має вигляд:

$$F(x_1, \dots, x_n) = c_1x_1 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max(\min),$$
$$\begin{cases} a_1x_1 + \dots + a_nx_n \leq 0, \\ \dots \\ a_mx_1 + \dots + a_nx_n \leq 0, \\ x_1, \dots, x_n \geq 0. \end{cases}$$

Розглянемо деякі приклади.

Графічний метод розв'язування задачі лінійного програмування. Якщо задача лінійного програмування містить дві змінних, то її можна розв'язати графічним методом, який містить два етапи:

- 1) побудова області допустимих розв'язків, що задовольняє всім обмеженням моделі;
- 2) відшукування оптимального розв'язку на множині допустимих розв'язків.

Розглянемо таку задачу [Помилка! Джерело посилання не знайдено.], для якої вже побудовано математичну модель:

$$F(x_1, x_2) = 5x_1 + 4x_2 \rightarrow \max,$$
$$\begin{cases} 6x_1 + 4x_2 \leq 24, \\ x_1 + 2x_2 \leq 6, \\ -x_1 + x_2 \leq 1, \\ x_2 \leq 2, \\ x_1, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Графічну візуалізацію наведено на

Рис. 1. Сірим кольором позначено область допустимих розв'язків, синьою стрілкою – напрямний вектор. З аналізу графіку видно, що максимального значення функція $F(x_1, x_2)$ за даних обмежень буде набувати у точці (3, 1.5) як точка перетину ліній $x_1 + 4x_2 = 24$ та $x_1 + 2x_2 = 6$. Відповідно максимальне значення функції $F(x_1, x_2)$ за даних обмежень буде дорівнювати 21.

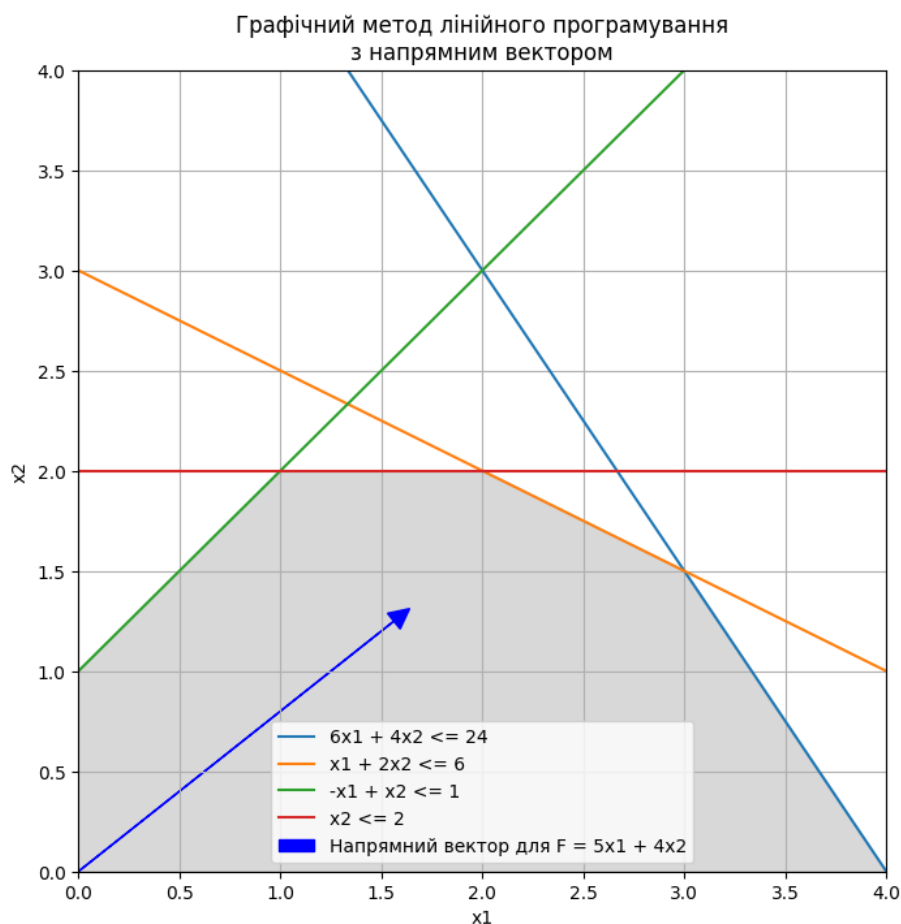


Рис. 1

Розглянемо використання функції `linprog` з модуля `SciPy`. Зауважимо, що вона призначена для мінімізації цільової функції F (для максимізації $-F$).

Спочатку вводимо всі необхідні коефіцієнти цільової функції і лівої та правої частини обмежень. Зазначимо, що окремо задається умова на невід'ємність змінних:

```
# коефіцієнти цільової функції (-F для максимізації)
c = [-5, -4]
# ліва частина обмежень
A = [
    [6, 4],
    [1, 2],
    [-1, 1],
    [0, 1]
]
# права частина обмежень
b = [24, 6, 1, 2]
# межі для змінних (всі змінні мають бути не від'ємними)
bounds = [(0, None), (0, None)]
```

Після цього переходимо до відшукування значень змінних, за яких досягається максимум цільової функції і власне її значення:

```
# Розв'язування задачі лінійного програмування
res = linprog(c, A_ub=A, b_ub=b, bounds=bounds, method='simplex')
print('Значення змінних:')
print('x1 =', res.x[0])
print('x2 =', res.x[1])
print('Максимальне значення цільової функції F =', -res.fun)
```

Отримаємо такий результат:

```
Значення змінних:
x1 = 3.0
x2 = 1.5
Максимальне значення цільової функції F = 21.0
```

Наведемо деякі пояснення до програмного коду. Перш за все зазначимо, що для задання коефіцієнтів використано списки:

- для цільової функції та правої частини обмежень одновимірні списки c (елементи з протилежним знаком) та b відповідно;
- для лівої частини обмежень двовимірний список A ;
- для обмежень на невід'ємність змінних список $bounds$.

За функцією `linprog` відшукується максимальне значення функції $F = 21$ за допустимих значень змінних $x_1 = 3$ та $x_2 = 1.5$.

Задача цілочисельного програмування. Основним завданням розв'язування задачі цілочисельного лінійного програмування є відшукування оптимального розв'язку (максимального чи мінімального) для лінійної цільової функції за умови обмежень (лінійні нерівності і/або рівняння), і всі змінні можуть набувати тільки цілих значень. Наведемо приклад використання модуля PuLP для розв'язування такого типу задач.

Перш за все треба встановити модуль PuLP (!`pip install pulp`). Після цього необхідно імпортувати необхідні функції для розв'язування задачі цілочисельного лінійного програмування:

```
from pulp import LpMaximize, LpProblem, LpVariable, lpSum
```

Наведемо програмний код для розв'язування такої задачі лінійного цілочисельного програмування [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]:

$$F(x_1, x_2) = 7x_1 + 10x_2 \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} -x_1 + 3x_2 \leq 6, \\ 7x_1 + x_2 \leq 35, \\ x_1, x_2 \geq 0 \text{ і цілі.} \end{cases}$$

```

# Створення задачі
prob = LpProblem("ЗЦЛП", LpMaximize)
# Змінні
x1 = LpVariable("x1", lowBound=0, cat="Integer")
x2 = LpVariable("x2", lowBound=0, cat="Integer")
# Цільова функція
prob += 7 * x1 + 10 * x2, "Цільова Функція"
# Обмеження
prob += -x1 + 3*x2 <= 6, "Обмеження 1"
prob += 7*x1 + x2 <= 35, "Обмеження 2"
# Розв'язання задачі
prob.solve()
# Виведення результатів
print(f"Status: {prob.status}")
print(f"x1 = {x1.varValue}")
print(f"x2 = {x2.varValue}")
print(f"Значення цільової функції = {prob.objective.value()}")

```

Отримаємо такий результат:

```

Status: 1
x1 = 4.0
x2 = 3.0
Значення цільової функції F = 58.0

```

Наведемо деякі пояснення до програмного коду та отриманого результату.

Створюємо задачу цілочисельного лінійного програмування (prob) з назвою «ЗЦЛП», завданням у якій є максимізація цільової функції:

```
prob = LpProblem("ЗЦЛП", LpMaximize)
```

Далі вказуємо змінні, які використовуються у моделі задачі, з визначенням умов невідомості (lowBound=0) та цілочисельності (cat="Integer"):

```
x1 = LpVariable("x1", lowBound=0, cat="Integer")
```

```
x2 = LpVariable("x2", lowBound=0, cat="Integer")
```

До створеної задачі prob додаємо цільову функцію

```
prob += 7 * x1 + 10 * x2, "Цільова Функція"
```

та обмеження:

```
prob += -x1 + 3*x2 <= 6, "Обмеження 1"
```

```
prob += 7*x1 + x2 <= 35, "Обмеження 2"
```

За методом solve() розв'язується задачі цілочисельного лінійного програмування prob. Після виводяться результати, де Status: 1 означає, що задача розв'язана і знайдено оптимальний розв'язок. Далі наводяться значення змінних, при яких функція досягає максимального значення при заданих обмеженнях, та власне значення цільової функції.

Аналогічний підхід і до розв'язування транспортної задачі з використанням модуля PuLP [1].

Розглянемо способи розв'язування задачі комівояжера з використанням мови Python. Зауважимо, що розроблені різні методи її розв'язування.

Задачу комівояжера формують так. Торговець, починаючи з деякого міста, хоче відвідати кожне з інших міст один і лише один раз і повернутися в початковий пункт. У якому порядку повинен він відвідувати міста, щоб мінімізувати сумарну пройдену відстань? Під «відстанню» можна розуміти час, витрати або інший вимір за бажанням. Відстані (або витрати) між будь-якими двома містами вважаються відомими [4, с.110].

Для розв'язування задачі комівояжера розроблено різні алгоритми. Ми зупинимось на розв'язуванні задачі комівояжера як задачі лінійного програмування з цільовою функцією

$$F = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

та обмеженнями

$$\sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, i \in I,$$

$$\sum_{i \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, j \in I,$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Розглянемо такий приклад [3, с.172]. Дано матрицю відстаней між дорогами, що з'єднують міста, які повинен відвідати комівояжер (табл.1).

Таблиця 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	18	12	7	13	9
2	22	0	18	11	19	15
3	19	8	0	15	17	10
4	22	14	18	0	15	17
5	11	10	21	9	0	19
6	18	12	15	10	14	0

Перш за все треба задати назви міст (одновимірний список `cities`), відстані між ними (двовимірний список `distances`) та визначити кількість міст (змінна `n`). Зазначимо, що задача лінійного програмування `problem` (змінні, цільова функція та обмеження) формується та розв'язується аналогічно до попередньої задачі. Детальніше зупинимся на виведенні результатів.

Фрагмент програмного коду для виведення результату є таким:

```
# Виведення результату
print("Оптимальний маршрут:")
route = []
for i in range(n):
    for j in range(n):
        if pulp.value(x[i, j]) == 1:
            route.append((cities[i], cities[j]))
print(route)
print("Довжина маршруту:", pulp.value(problem.objective))
```

Отримаємо:

```
Оптимальний маршрут:
[('A', 'F'), ('B', 'D'), ('C', 'B'), ('D', 'E'), ('E', 'A'), ('F', 'C')]
Довжина маршруту: 69.0
```

Зауважимо, що такий результат є не надто інформативний (особливо якщо буде більш міст), оскільки не бачимо безпосередньо маршруту, тобто послідовності міст, які повинен відвідати комівояжер і не задається початкового міста. Тому до програмного коду додамо можливість визначення початкового міста (у даному випадку місто В) та виведення результату у вигляді послідовності міст:

```
# Визначення початкового міста та маршруту
start_city = 'B'
current_city = start_city
final_route = [start_city]
while len(final_route) < n + 1:
    for (i, j) in route:
        if i == current_city:
            final_route.append(j)
            current_city = j
            break
print(" -> ".join(final_route))
print("Довжина маршруту:", pulp.value(problem.objective))
```

Отримаємо результат:

```
B -> D -> E -> A -> F -> C -> B
Довжина маршруту: 69.0
```

Для розв'язування задач лінійного програмування перш за все треба створити її математичну модель, зокрема визначити змінні, побудувати цільову функцію та задати обмеження. Далі визначити програмне забезпечення, яке використовуватиметься для відшукування оптимального розв'язку. У статті наведено приклади використання мови Python з відповідними модулями SciPy та PuLP. Зазначимо, що цими модулями не обмежується можливості мови Python. Є інші модулі, які можна використовувати для розв'язування подібних задач, наприклад CVXPY чи Gurobi. Перспективи подальших розвідок вбачаємо у дослідженні мови Python з її різноманітними бібліотеками як засобу розв'язування задач, які виникають у галузі штучного інтелекту.

1. Бишовець, Н. Г., Бишовець, Н. М., Бойков, А. І., & Фуртат, С. О. (2024). Задача комівояжера як універсальний інструмент для оптимізації маршрутів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74), (1), 97–102.
2. Кобильник, Т. П., Сікора, О. В., & Вдовичин, Т. Я. (2024). Методичні аспекти розв'язування транспортної задачі з мовою Python. *Молодь і ринок*, (12(232)), 72–77.
3. Кузькін, О. Ф., Муковська, Д. Я., Райда, І. М., & Веремесенко, Л. А. (2024). Оптимізація оперативного управління використання парку автомобільних транспортних засобів промислового підприємства. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1(88), 63–71.
4. Лавров, Є. А., та ін. (2017). *Математичні методи дослідження операцій: підручник*. Суми: Сумський державний університет.
5. Семенова, Н. В., & Колечкіна, Л. М. (2009). *Векторні задачі дискретної оптимізації на комбінаторних множинах: методи дослідження та розв'язання: Монографія*. Київ: Наукова думка.
6. Чілікіна, Т., Парфьонова, Т., & Руденко, Н. (2023). Огляд програмного забезпечення для розв'язання задач оптимізації. *Інформаційні технології та суспільство*, 2(8), 90–96.
7. Bauckhage, C. (2019). *NumPy / SciPy Recipes for Data Science: Linear Programming*.
8. Mitchell, S., O'Sullivan, M., & Dunning, I. (2011). *PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python*.

9. Poornima, N., Girish, N., & Patil, M. B. (2022). *Conceptualizing Python in Google COLAB*. Bilaspur: Shashwat Publication. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/357929808>.
10. Sundarrajan, M., Jothi, A., Prabakar, D., Kadry, S., & Prasath, R. (2023). The smart coverage path planner for autonomous drones using TSP and tree selection. In Kadry, S., & Prasath, R. (Eds.), *Mining Intelligence and Knowledge Exploration. MIKE 2023*. Lecture Notes in Computer Science (LNAI, Volume 13924). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-44084-7_16.
11. Taha, H. A. (2017). *Operations Research: An Introduction* (10th ed.). Pearson.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ У ПОРУВАТИХ СТРУКТУРАХ З ВИКОРИСТАННЯМ WOLFRAM MATHEMATICA ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕКОЛОГІЧНИХ ФІЛЬТРІВ

^{1,2} Кузик Олег, ²Даньків Олеся, ¹Угрин Леся

¹Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

²Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, Дрогобич, Україна
olehkuzyk74@gmail.com, dankivolesya@dspu.edu.ua

У роботі представлено підхід до підвищення ефективності екологічних фільтрів шляхом оптимізації їх поруватої структури за допомогою ультразвукової обробки. Побудовано нелінійну модель формування нанокластерів вакансій та їх періодичних утворень під впливом ультразвуку в поруватих матеріалах. Встановлено критерії їх формування за величиною амплітуди деформації, середньої концентрації вакансій та температури. Для математичного моделювання процесів формування вакансійних кластерів та зміни коефіцієнта дифузії використано середовище Wolfram Mathematica. Моделі дозволяють прогнозувати умови для самоорганізації наноструктур у поруватих матеріалах, що забезпечують підвищення їх фільтраційних властивостей. Отримані результати можуть бути використані для створення інтелектуальних систем очищення повітря та води

Ключові слова: дифузія, порувата структура, ультразвук, нанокластер, деформація, екологічні фільтри, Wolfram Mathematica

Key word: diffusion coefficient, porous structure, ultrasound, nanocluster, deformation, ecological filters, Wolfram Mathematica

Вступ

Проблеми забруднення довкілля залишаються одними з найактуальніших викликів для сучасної науки та техніки. Забезпечення чистоти повітря, води та ґрунтів неможливе без ефективних фільтраційних систем, що базуються на застосуванні спеціально структурованих матеріалів, які здатні захоплювати та затримувати шкідливі домішки на молекулярному й нанорівнях [1]. Особливий інтерес у сфері захисту довкілля викликають **пороваті матеріали**. Завдяки своїй розвиненій внутрішній поверхні та здатності до дифузійного транспорту молекул, вони широко використовуються у фільтраційних системах, системах очищення стічних вод, сорбційних установках для уловлювання шкідливих газів, а також у каталізаторах для розщеплення токсичних речовин. Однак, ефективність поруватих матеріалів безпосередньо залежить від **розміру й форми пор**, а також від їхнього **розподілу в об'ємі матеріалу**. Одним із сучасних методів цілеспрямованого впливу на мікро- та наноструктуру таких матеріалів є **ультразвукова обробка**, що дозволяє змінювати пористість, формувати дефектні структури у вигляді вакансійних кластерів і, як наслідок, значно впливати на коефіцієнти дифузії. Разом з тим, завдяки розвитку обчислювальних засобів, зокрема платформи **Wolfram Mathematica**, з'явилася можливість точно моделювати

ці процеси на етапі проектування матеріалу, що дозволяє мінімізувати експериментальні витрати та скоротити час розробки екологічних фільтрів нового покоління.

Наноструктуровані матеріали останнім часом викликають значний інтерес дослідників. Це пов'язано з нетиповістю їх властивостей порівняно з об'ємним матеріалом. У рівноважному стані кристал завжди містить певну кількість вакансій. Цей факт пояснюється тим, що при утворенні вакансії, поряд зі зростанням енергії, відбувається збільшення ентропії. В результаті мінімум вільної енергії спостерігається не для ідеального кристала, а для кристала з вакансіями. У роботі [2] показано, що навіть при низьких температурах рівноважна концентрація вакансій може досягати великих значень, якщо об'ємна деформація перевищує деяке критичне значення.

Відомо, що концентрація дефектів, зокрема вакансій, у твердому тілі, яке піддається ультразвуковій обробці, нелінійно залежить як від температури, так і від інтенсивності створюваних акустичних коливань [3]. Причому в певному інтервалі потужності ультразвуку та температури спостерігається значне (більше, ніж на порядок) збільшення дефектності зразків, тобто акустичний вплив у цьому випадку носить яскраво виражений синергетичний характер. При великих концентраціях вакансій, які взаємодіють між собою та з атомами кристалічної матриці через деформаційне поле, можливе виникнення процесів їх самоорганізації в окремі кластери та періодичні структури [4]. Утворення періодичної ґратки пор при опроміненні металів та діелектриків високоенергетичними пучками нейтронів та електронів спостерігали у роботі [5]. У роботі [6] показано, що за допомогою ультразвукової хвилі можна керувати транспортними властивостями напівпровідників і змінювати їх структуру.

1. Модель

Порувате середовище моделюється системою сферичних частинок (гранул) радіусом $r_s = R_0 - r_0$ та домішок радіусом r_d , де $2r_0$ – відстань між гранулами, яку надалі розглядатимемо як діаметр пори (рис. 1, а). Виберемо елемент об'єму поруватого матеріалу (як показано на рис. 1, б) у вигляді циліндра радіусом R_0 з циліндричною порою радіусом r_0 ($R_0 \gg r_0$). Нехай така система містить вакансії із середньою концентрацією N_{d0} .

Пружне поле, що виникає у твердому тілі, діє на вакансію із силою:

$$\vec{F} = -K \text{grad} \left(\varepsilon(r) \Delta \Omega_d + \frac{\partial^2 \varepsilon(r)}{\partial r^2} r_{da}^2 \Delta \Omega_d \right), \quad (1)$$

де K – модуль пружності; r_{da}^2 – середнє значення квадрата відстані між вакансією та атомами матриці; $\Delta \Omega_d$ – зміна об'єму кристала одним дефектом; $\varepsilon(r)$ – радіальна компонента тензора деформації.

Під дією цієї сили дефекти у пружному полі отримують швидкість:

$$\vec{v} = \mu \vec{F} = \frac{D_v K}{k_B T} \text{grad} \left(\varepsilon(r) \Delta \Omega_d + \frac{\partial^2 \varepsilon(r)}{\partial r^2} r_{da}^2 \Delta \Omega_d \right), \quad (2)$$

де μ , D_v – рухливість та коефіцієнт дифузії вакансії; T – температура; k_B – стала Больцмана. Тут для визначення рухливості домішок використано співвідношення Ейнштейна.

Як бачимо з формули (2), швидкість вакансій у пружному полі визначається градієнтами деформації та зміною об'єму кристала цими дефектами.

Отже, дефекти, які є центрами стиску ($\Delta \Omega_d < 0$), а такими є вакансії, будуть рухатися в область, що зазнає відносного стиску.

З урахуванням (2) стаціонарний потік вакансій можна записати у вигляді:

$$j = -D_v \frac{\partial N_d}{\partial r} + N_d \frac{D_v K}{k_B T} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Delta \Omega_d + \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial r^3} r_{da}^2 \Delta \Omega_d \right). \quad (3)$$

Вираз для механічної напруги пружного середовища має вигляд:

$$\sigma = E \varepsilon + E \alpha \varepsilon^2 + E \beta \varepsilon^3 + E a_0^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2} - K N_d \Delta \Omega_d, \quad (4)$$

де E – модуль Юнга; α , β – константи пружного ангармонізму; a_0 – характеристична відстань взаємодії атомів кристалічної матриці між собою, яка приблизно дорівнює параметру кристалічної ґратки матриці.

Механічна напруга у твердому тілі, яке зазнає впливу ультразвуку, з урахуванням ангармонічних доданків:

$$\tilde{\sigma} = \sigma + E\varepsilon_0 \cos \omega t + E\alpha(\varepsilon_0 \cos \omega t)^2 + E\beta(\varepsilon_0 \cos \omega t)^3, \quad (5)$$

де ε_0 – амплітуда деформації, створеної ультразвуком. Тут враховано, що довжина хвилі $\lambda \gg R_0$. Усереднивши за часом, отримаємо:

$$\tilde{\sigma} = E(\varepsilon + \alpha\varepsilon^2(1 + \frac{\varepsilon_0^2}{2\varepsilon^2}) + \beta\varepsilon^3 + a_0^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2}) - KN_d \Delta \Omega_d = E(\varepsilon + \tilde{\alpha}\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + a_0^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2}) - KN_d \Delta \Omega_d, \quad (6)$$

де $\tilde{\alpha} = \alpha(1 + \frac{\varepsilon_0^2}{2\varepsilon^2})$.

З умови рівноваги деформованого тіла $\frac{\partial \tilde{\sigma}}{\partial r} = 0$ отримаємо рівняння для деформації:

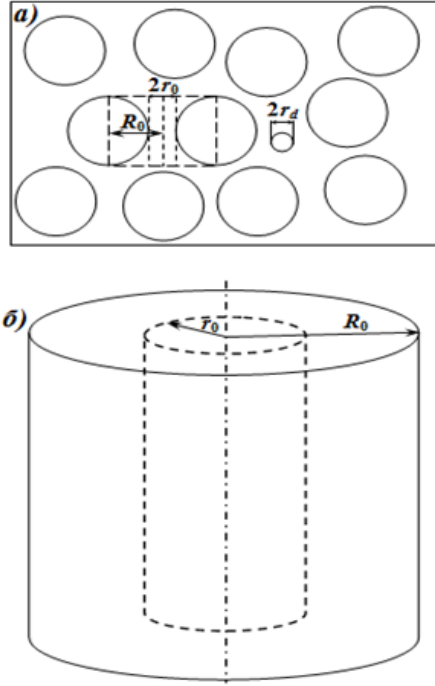


Рис. 1. Геометрична модель поруватої структури

$$E \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + E\tilde{\alpha} \frac{\partial(\varepsilon^2)}{\partial r} + E\beta \frac{\partial(\varepsilon^3)}{\partial r} + Ea_0^2 \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial r^3} - K \frac{\partial N_d}{\partial r} \Delta \Omega_d = 0. \quad (7)$$

З урахуванням (7) стаціонарне рівняння дифузії для вакансій можна записати у вигляді:

$$\text{div} \left[D_v \frac{\partial N_d}{\partial r} + N_d \frac{D_v K}{k_B T} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Delta \Omega_d + \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial r^3} r_{da}^2 \Delta \Omega_d \right) \right] + G_d - \frac{N_d}{\tau_d} = 0, \quad (8)$$

де G_d , τ_d – відповідно, швидкість генерації та час життя вакансій.

Для знаходження розподілу концентрації вакансій та деформації в досліджуваній структурі необхідно розв'язати систему нелінійних диференціальних рівнянь (7) та (8).

Представимо концентрацію вакансій та деформацію у вигляді:

$$N_d(r) = N_1(r) + N_0, \quad (9)$$

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_1(r) + N_0 \Delta \Omega_d, \quad (10)$$

де $N_1(r)$, $\varepsilon_1(r)$ – просторово неоднорідні складові концентрації вакансій та деформації, відповідно; $N_1(r) \ll N_0$.

Проінтегрувавши рівняння (8) з урахуванням (9) та (10), отримаємо:

$$N_1 = \frac{N_0 \theta_v}{k_B T} \left(\varepsilon_1 + \frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial r^2} r_{da}^2 \right). \quad (11)$$

Підставивши (11) у (7) з урахуванням (9) та (10), отримаємо диференціальне рівняння для деформації, яке після інтегрування можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial r^2} - a\varepsilon_1 + f\varepsilon_1^2 - c\varepsilon_1^3 = 0, \quad (12)$$

$$\text{де } a = \frac{1 - \frac{N_0}{N_c}}{r_{da}^2 \left(\frac{N_0}{N_c} - \frac{a_0^2}{r_{da}^2} \right)}; \quad f = \frac{|\tilde{\alpha}|}{r_{da}^2 \left(\frac{N_0}{N_c} - \frac{a_0^2}{r_{da}^2} \right)}; \quad c = \frac{\beta}{r_{da}^2 \left(\frac{N_0}{N_c} - \frac{a_0^2}{r_{da}^2} \right)}; \quad N_c = \frac{E \cdot k_B T}{\theta_v^2}.$$

Тут враховано, що $\alpha < 0$, $\beta > 0$.

Розв'язок рівняння (12) залежно від середньої концентрації вакансій та амплітуди ультразвукової хвилі має наступний вигляд:

$$r = \int \frac{d\varepsilon_1}{\sqrt{a\varepsilon_1^2 - \frac{2f\varepsilon_1^3}{3} + \frac{c\varepsilon_1^4}{2}}} + r_c, \quad (13)$$

де r_c – стала інтегрування.

Зробивши заміну $\varepsilon_1 = \frac{1}{z}$, цей інтеграл можна записати наступним чином:

$$r - r_c = - \int \frac{dz}{\sqrt{a(z - \frac{f}{3a})^2 + \Delta}}, \quad (14)$$

$$\text{де } \Delta = -\frac{f^2}{9a} + \frac{c}{2}.$$

Аналіз з використанням Wolfram Mathematica показує, що інтеграл (14) виражається через аналітичні функції, тип яких визначається знаками коефіцієнтів a та Δ .

1. Якщо виконуються умови

$$\frac{N_0}{N_c} < \frac{a_0^2}{r_{da}^2} \quad \text{та} \quad \frac{2\tilde{\alpha}^2}{9\beta} < 1 - \frac{N_0}{N_c} \quad (a < 0 \quad \text{і} \quad \Delta < 0),$$

то

$$\varepsilon_1 = 0, \quad N(r) = N_0,$$

тобто процеси самоорганізації не відбуваються.

Враховуючи, що $\frac{2\alpha^2}{9\beta} = \frac{4}{9} [4]$ та $\varepsilon^2 \approx \frac{\varepsilon_0^2}{2} + \left(\frac{\theta_v}{K} N_0 \right)^2$, то можна записати:

$$\frac{N_0}{N_c} < \frac{a_0^2}{r_{da}^2} \quad \text{та} \quad \varepsilon_0^2 < \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\frac{3}{2}\sqrt{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1}. \quad (15)$$

При перевищенні середньою концентрацією дефектів значення $N_0 = N_c \frac{a_0^2}{r_{da}^2}$, незалежно від амплітуди деформації ультразвукової хвилі, просторово однорідний розв'язок стає нестійким і виникає новий просторово неоднорідний стаціонарний стан (утворюються кластери або періодичні вакансійні структури). Окрім цього, при невиконанні 2-ї умови (15) завжди виникатимуть кластери вакансій. Умови формування кластерів або періодичних структур вакансій при їх сталій концентрації визначаються температурою. Зокрема, умови (15) можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{T_c}{T} < \frac{a_0^2}{r_{da}^2}, \quad \varepsilon_0^2 < \left(\frac{\sqrt{2}k_B T_c}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{1}{\frac{3}{2}\sqrt{1 - \frac{T_c}{T}} - 1} - 1 \right)^{-1}, \quad (16)$$

$$\text{де } T_c = \frac{\theta_v^2 N_0}{E \cdot k_B}.$$

$$2. \text{ При } \frac{a_0^2}{r_{da}^2} < \frac{N_0}{N_c} < 1 - \frac{2\tilde{\alpha}^2}{9\beta} \quad \text{та} \quad \varepsilon_0^2 < \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\frac{3}{2}\sqrt{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1},$$

розв'язок рівняння (12) має вигляд:

$$\varepsilon_1(r) = -\frac{A}{B + sh(-\sqrt{a}(r - r_0))}. \quad (17)$$

$$3. \text{ При } 1 - \frac{2\tilde{\alpha}^2}{9\beta} < \frac{N_0}{N_c} < 1 \quad \text{та} \quad \varepsilon_0^2 < \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1}$$

або при

$$\frac{a_0^2}{r_{da}^2} < \frac{N_0}{N_c} < 1 - \frac{2\tilde{\alpha}^2}{9\beta}, \quad \varepsilon_0^2 > \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1},$$

розв'язок рівняння (12) отримаємо у вигляді:

$$\varepsilon_1(r) = -\frac{A}{B + ch(\sqrt{a}(r - r_0))}. \quad (18)$$

$$4. \text{ При } \frac{N_0}{N_c} > 1 \quad \text{та} \quad \varepsilon_0^2 < \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1}$$

або при

$$\varepsilon_0^2 > \left(\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} \right)^2 \left(\frac{N_0}{N_c} \right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{1 - \frac{N_0}{N_c}} - 1} - 1 \right)^{-1} \quad \text{та} \quad \frac{N_0}{N_c} < \frac{a_0^2}{r_{da}^2},$$

розв'язок рівняння (12) матиме вигляд:

$$\varepsilon_1(r) = -\frac{A}{B + \sin(\sqrt{|a|}(r - r_0))}, \quad (19)$$

де $A = 3\sqrt{2}|a|(|9ca - 2f^2|)^{-\frac{1}{2}}$; $B = \sqrt{2}f(|9ca - 2f^2|)^{-\frac{1}{2}}$.

Таким чином, при певних значеннях концентрації дефектів N_0 (чи температури T) та амплітуди ультразвукової хвилі ε_0 формуються кластери вакансій чи їх періодичні утворення. На рис. 2 графічно зображено області можливого формування кластерів вакансій залежно від значення ε_0^2 та $\frac{N_0}{N_c} \left(\frac{T_c}{T} \right)$. Розрахунки проводились при наступних значеннях параметрів: $\frac{a_0^2}{r_{da}^2} = 0,01$, $\frac{\sqrt{2}k_B T}{\theta_v} = 0,01$.

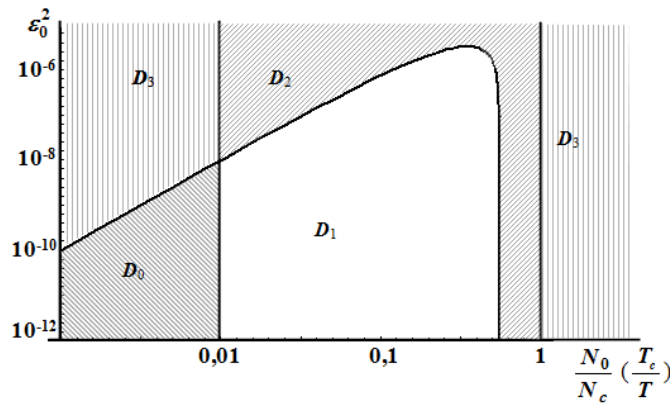


Рис. 2. Області можливого формування кластерів вакансій залежно від значення ε_0^2 та $\frac{N_0}{N_c} \left(\frac{T_c}{T} \right)$:

- D_0 – процеси самоорганізації вакансій не відбуваються;
- D_1 – утворюється асиметричний кластер вакансій (формула (17));
- D_2 – утворюється симетричний кластер вакансій (формула (18));
- D_3 – утворюється періодична ґратка вакансій (формула (19))

2. Комп'ютерне моделювання залежності радіуса пор від концентрації вакансій та температури

Підставивши формули (16)–(18) у формулу (11), можна знайти концентрацію вакансій. На рис. 3 представлено просторовий розподіл концентрації вакансій при утворенні симетричного кластера в околі пори радіусом r_0 .

Радіус кластера $r_{cluster}$ залежить від концентрації дефектів, пружних сталих і температури та може бути визначений наступним чином:

$$r_{cluster} = \frac{1}{\sqrt{a}} = r_{da} \sqrt{\frac{\frac{N_0 - a_0^2}{N_c - r_{da}^2}}{1 - \frac{N_0}{N_c}}} \quad (20)$$

або

$$r_{cluster} = \frac{1}{\sqrt{a}} = r_{da} \sqrt{\frac{\frac{T_c - a_0^2}{T - r_{da}^2}}{1 - \frac{T_c}{T}}} \quad (21)$$

При збільшенні концентрації вакансій (зменшенні температури) радіус кластера монотонно збільшується та належить нанометровому діапазону.

Очевидно, що концентрація дефектів N_0 може бути представлена у вигляді:

$$N_0 = N'_0 + N_{0us}(\varepsilon_0), \quad (22)$$

де N'_0 – рівноважна концентрація вакансій, які існують у твердому тілі без впливу ультразвуку; N_{0us} – концентрація вакансій, які утворюються під впливом ультразвуку.

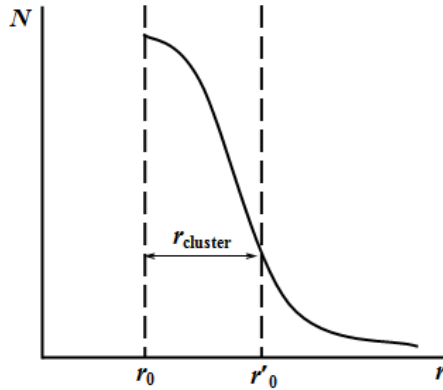


Рис. 3. Просторовий розподіл концентрації вакансій в околі пори (утворення симетричного кластера вакансій)

Отже, розмір кластера також залежатиме від амплітуди ультразвукової хвилі [7]. Підставивши (22) у (20), формулу для розміру кластера можна записати у вигляді:

$$r_{cluster} = r_{da} \sqrt{\frac{\frac{N'_0 + G_d - a_0^2}{N_c + G_{dc} - r_{da}^2}}{1 - \frac{N'_0 + G_d}{N_c + G_{dc}}}}, \quad (23)$$

де $G_{dc} = \frac{N_c}{\tau_d}$ – деяке критичне значення швидкості генерації вакансій під впливом ультразвуку.

Таким чином, при збільшенні швидкості генерації вакансій під впливом ультразвуку (збільшенні амплітуди акустичної хвилі) розмір кластера монотонно зростатиме.

На рис. 4 представлено залежність радіуса кластера вакансій від їх концентрації (температури) при різних значеннях характеристичної відстані взаємодії вакансія – атом матриці r_{da} .

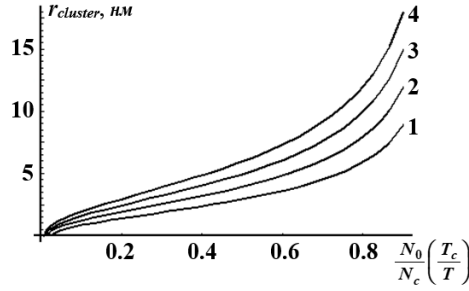


Рис. 4. Залежність радіуса кластера вакансій від їх концентрації при різних значеннях характеристичної відстані r_{da} :
1 – $r_{da} = 3$ нм; **2** – $r_{da} = 4$ нм; **3** – $r_{da} = 5$ нм; **4** – $r_{da} = 6$ нм

Оскільки при перевищенні концентрацією вакансій певного критичного значення (при температурі, меншій за деяке критичне значення) утворюються вакансійні кластери або їх періодичні утворення, то можна вважати, що збільшуватиметься ступінь поруватості структури внаслідок збільшення розміру пор та утворення нових пор. Розмір пори r'_0 , на поверхні якої утворюється кластер вакансій, може бути визначений наступним чином (див. рис. 2.3):

$$r'_0 = r_0 + r_{cluster}. \quad (24)$$

Як видно з рис. 4, радіус кластера може досягати 15 нм і, відповідно, на таку ж величину збільшиться й радіус пори.

4. Розрахунок коефіцієнта дифузії домішок у поруватому матеріалі засобами Wolfram Mathematica

Знайдемо залежність коефіцієнта дифузії D домішок у поруватій структурі залежно від радіуса пор у межах кінетичної теорії.

Коефіцієнт дифузії газів:

$$D_0 = \frac{\bar{v}^2}{3z}, \quad (25)$$

де $\bar{v}$ – середня швидкість; z – число зіткнень молекул за одиницю часу з іншими молекулами та гранулами поруватої структури.

Число зіткнень домішок з іншими домішками та гранулами визначимо як суму окремо зіткнень з молекулами та зіткнень з гранулами структури. Для цього вважатимемо домішки та гранули кульками з радіусами r_d та $(R_0 - r_0)$, відповідно (рис. 1). Врахувавши, що інші домішки також рухаються, а гранули нерухомі, повне число зіткнень можна записати у вигляді [8]:

$$z = 4\sqrt{2}\pi r_d^2 n_0 \bar{v} + \pi(r_d + R_0 - r_0)^2 n_{tr} \bar{v}, \quad (26)$$

де n_{tr} , n_0 – концентрація гранул та домішок у вільному від гранул об'ємі, відповідно.

Концентрація домішок у вільному від гранул об'ємі може бути визначена через концентрацію молекул у повному об'ємі структури n як $n_0 = n \frac{R_0^3}{r_0^3}$. Тоді коефіцієнт дифузії можна записати у вигляді:

$$D_0 = \frac{\bar{v}}{3 \left(4\sqrt{2}\pi r_d^2 n \frac{R_0^3}{r_0^3} + \frac{3}{4R_0^3} (r_d + R_0 - r_0)^2 \right)}. \quad (27)$$

З урахуванням (24) отримаємо залежність коефіцієнта дифузії від розміру кластера вакансій:

$$D_{0US} = \frac{\bar{v}}{3 \left(4\sqrt{2}\pi r_d^2 n \frac{R_0^3}{(r_0 + r_{cluster})^3} + \frac{3}{4R_0^3} (r_d + R_0 - r_0 - r_{cluster})^2 \right)}. \quad (28)$$

На рис. 5 представлено залежність відносної зміни коефіцієнта дифузії D_{0US}/D_0 від середньої концентрації вакансій при різних радіусах домішок.

Така залежність має монотонно зростаючий характер. Зокрема, при збільшенні відносної концентрації вакансій до значення $\frac{N_0}{N_c} = 0,55$ коефіцієнт дифузії збільшується в 10 разів.

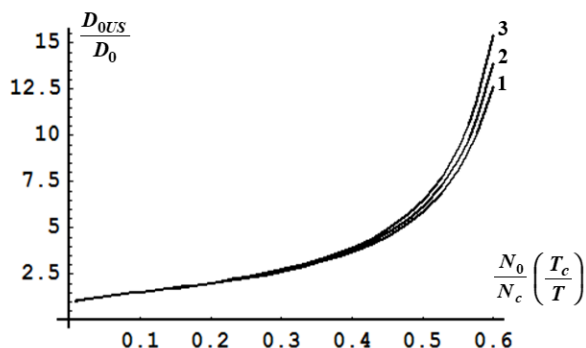


Рис. 5. Залежність зміни коефіцієнта дифузії D_{0US}/D_0 від концентрації вакансій (температури) за різних радіусів домішки: **1** – $r_d = 0,45$ нм; **2** – $r_d = 0,3$ нм; **3** – $r_d = 0,15$ нм

Для прикладу, при моделюванні було обрано матеріали з поруватою структурою: тальк $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$ – класичну основну компоненту сорбентів у системах очищення води. У моделюванні враховувались реальні домішки, які часто зустрічаються у водних та повітряних забрудненнях: **йони важких металів (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+}); літій Li^+** (на прикладі очищення стічних вод літєвого виробництва).

Збільшення коефіцієнта дифузії йонів літію після ультразвукової обробки тальку відповідає результатам розрахунків у межах запропонованої моделі. Результати теоретичних розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними при малих значеннях концентрації домішок, оскільки для розрахунку коефіцієнта дифузії використовувалася кінетична теорія газів.

Висновки

1. Підтверджено перспективність використання ультразвукової обробки для модифікації поруватих матеріалів з метою покращення їх фільтраційних та сорбційних властивостей в екологічних технологіях очищення.
2. **Запропонована математична модель**, реалізована в середовищі **Wolfram Mathematica**, дозволила змодельовати зміну коефіцієнта дифузії домішок у поруватих структурах під впливом ультразвуку. Встановлено, що зростання концентрації вакансій, спричинене ультразвуковим полем, призводить до збільшення розміру пор, що забезпечує **прискорення дифузійного переносу домішок**.
3. Встановлено, що при ультразвуковій обробці поруватих матеріалів типу тальку та кремнію формуються вакансійні кластери, які сприяють **збільшенню коефіцієнта дифузії для йонів Li^+ більш ніж у 10 разів** при температурі, меншій від критичної, що робить такий матеріал придатним для використання у фільтрах для очищення промислових стоків.
4. Застосування **Wolfram Mathematica** для автоматизації розрахунків забезпечує не тільки економію часу, а й можливість візуалізації дифузійних полів, що є особливо важливим для створення інтелектуальних систем очищення, які адаптуються до конкретних умов забруднення.

1. Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E.T., Abdelkareem, M.A., Mahmoud, M.S., Olabi, A.G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112.
2. Ostrovski, I.V., Nadtochii, A.B., Podolyan, A.A. (2002). Ultrasonically stimulated low-temperature redistribution of impurities in silicon. *Semiconductors*, 36, 367–369.
3. Buriak, J.M. (2002). Organometallic Chemistry on Silicon and Germanium Surfaces. *Chemical Reviews*, 102(5), 1271–1308.
4. Peleshchak, R.M., Kuzyk, O.V., Dan'kiv, O.O. (2020). The influence of acoustic deformation on the recombination radiation in InAs/GaAs heterostructure with InAs quantum dots. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 119, 113988.
5. Songa, J., Bazant, M. (2013). Effects of nanoparticle geometry and size distribution on diffusion impedance of battery electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 160, A15–A24.
6. Olikh, O.Ya., Ostrovskii, I.V. (2002). Ultrasound-stimulated increase in the electron diffusion length in p-Si crystals. *Physics of the Solid State*, 44(7), 1249–1253.
7. Peleshchak, R.M., Kuzyk, O.V., Dan'kiv, O.O. (2016). The influence of ultrasound on formation of self-organized uniform nanoclusters. *Journal of nano- and electronic physics*, 8(2), 02014.
8. Балабай, Р.М. (2009). *Обчислювальні методи із перших принципів у фізиці твердого тіла: квантово-механічна молекулярна динаміка*. Кривий Ріг: Видавничий дім.

INFORMATION SYSTEMS FOR MONITORING FOREST ECOSYSTEMS IN GLOBAL AND REGIONAL CONTEXT

Kukharska Nataliia
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
nataliia.p.kukharska@lpnu.ua
Semenyuk Serhiy
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
serhii.a.semeniuk@lpnu.ua

Abstract. The article discusses technological solutions for forest monitoring based on satellite data, in particular GFW, GLAD, GEDI, GFC and other platforms. The emphasis is placed on their functional purpose, integration capabilities and environmental significance. A comparative assessment and examples of practical application in the context of sustainable forest management are presented.

Keywords: Global Forest Watch (GFW), GLAD Alerts, Global Forest Change (GFC), Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), Global Land Cover (GLC), Climate Change Initiative – Land Cover (CCI LC), GlobalTreeSearch.

Introduction

Forests are one of the most important components of the global ecosystem. They cover approximately 31% of the planet's land surface and play an indispensable role in regulating climate, ensuring biodiversity, maintaining hydrological cycles, preserving soil fertility, and supporting human livelihoods. However, forest ecosystems are increasingly under threat from deforestation, degradation, climate change, and other anthropogenic factors.

For example, according to investigations conducted by NGL.media based on satellite imagery, over 60 thousand hectares of Ukrainian forests were completely destroyed in the temporarily occupied territories during the two years (from 2022 to 2024) of Russia's full-scale invasion of Ukraine. Analysts estimate that the economic losses amount to at least UAH 14 billion from the loss of timber that could have been harvested from these 60,000 hectares [1]. And these are direct losses, without taking into account the environmental consequences, which can be much more expensive to eliminate. In total, almost 30% of all forests in Ukraine have been damaged in some way as a result of the hostilities. This is about 3 million hectares of forests. This includes both occupied and de-occupied territories, areas where hostilities have occurred or are ongoing, as well as regions affected by rocket and Shahed drone attacks. The results obtained indicate Russian environmental terrorism in Ukraine. It is important to document these crimes in order to bring the perpetrators to justice and receive compensation for the damage caused.

Another problem in Ukraine is illegal logging, which the head of the State Agency of Forest Resources of Ukraine pointed out in his 2023 report, outlining measures to combat and prevent offenses in the field of forest use and forest protection [2]. Criminal liability for illegal logging – the illegal felling of trees or shrubs in forests, protective and other forest plantations, transportation, storage, sale of illegally felled trees or shrubs that caused significant damage – is regulated by the provisions of Article 246 of the Criminal Code of Ukraine [3]. One of the issues faced by law enforcement officers about the problem under consideration is obtaining timely operational information on the commission of these criminal offenses.

In this context, systematic, reliable and timely monitoring of forests is of utmost importance.

Functions and tasks of forest monitoring

Forest monitoring is a process of regular observation, collection and analysis of data on the state of forest ecosystems in order to detect changes, assess their scale and causes, predict further development of the situation and develop recommendations for decision-making.

In the 21st century, the development of digital technologies has dramatically changed approaches to forest monitoring. The widespread use of satellite platforms (e.g., Landsat, Sentinel, PlanetScope), unmanned aerial vehicles, and artificial intelligence systems has made it possible to monitor forests in a near real-time mode:

- Conduct near real-time monitoring.
- Cover large areas with high spatial and temporal resolution.
- Use automated algorithms to detect changes, classify forest lands, and estimate biomass and carbon stocks.
- Create open platforms that provide free access to up-to-date information for governments, scientists, businesses, and the public.

In this article, we will review and analyze the key resources and services for satellite and analytical monitoring of forest cover used in environmental practice.

Global Forest Watch (GFW) (<https://www.globalforestwatch.org/>) is a global online forest monitoring platform that combines satellite observation data, mapping technologies and analysis tools to provide transparent and up-to-date information on the state of the world's forests. Established by the World Resources Institute (WRI), GFW offers users access to a huge amount of data covering various aspects of forest cover, including deforestation, changes in forest condition, climate change and anthropogenic factors.

GFW has been allowing users to track forest health since 2000, and the map data is updated every 16 days.

The web-based platform uses a variety of technologies to obtain data, including images from NASA (National Aeronautics and Space Administration) and USGS (United State Geological Survey) satellites, mobile applications, geographic information systems (GIS), and data from national and regional forest reports. The platform uses Mapbox, Carto, Planet, and OpenStreetMap services, which ensures its integration with various data sources and tools, allowing users to receive accurate and up-to-date information on forest cover in a convenient format. Information about the identified changes is freely available to all users of the resource.

The Global Forest Watch map (Fig. 1) uses both color coding for the state of the forest belt and infrared imagery. According to the developers of the platform, each pixel of the map has its own infrared and color signature, and every 16 days the algorithm compares these signatures with new images. Users of Global Forest Watch can view the platform's map through a dozen different filters that allow them to monitor deforestation, intact forest strips, and in the long term, control the renewability of natural resources. For example, the red color on the map indicates a deforestation zone, and the blue color indicates a growth zone.

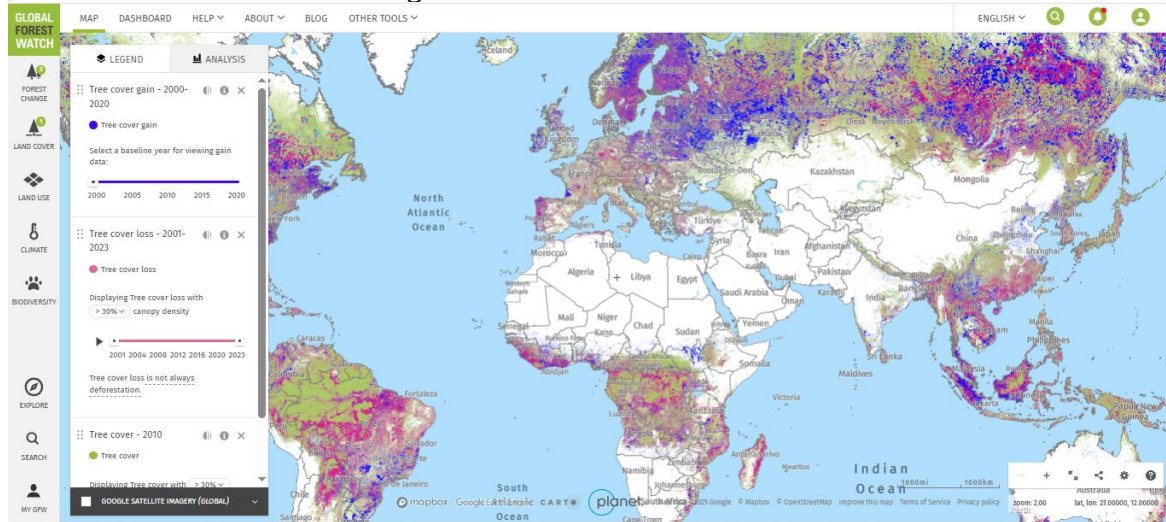


Fig. 1. Interactive forest cover map and other data available on the Global Forest Watch website [4]

Layers of Global Forest Watch

As of 2025, the Global Forest Watch platform offers more than 100 interactive layers covering various aspects of forest monitoring, including deforestation, regeneration, biodiversity, land use, and climate change. These layers are available through the GFW interactive map and the Open Data Portal.

See the main layers of Global Forest Watch:

1. GLAD and integrated deforestation alerts.

This layer combines data from GLAD-L (Landsat), GLAD-S2 (Sentinel-2) and RADD, providing fast and accurate detection of changes in forest cover. The alerts are updated weekly and cover tropical regions, allowing rapid response to illegal logging.

2. Tree cover loss and gain.

The GFW provides data on tree cover loss since 2001 and growth from 2000 to 2020 in five-year intervals. These layers are based on tree height, allowing for a more accurate assessment of changes in biomass and carbon stocks.

3. Net change in tree cover.

This layer shows the total change in tree cover between 2000 and 2020, including both losses and gains. This allows us to assess the overall balance of changes in forest ecosystems.

4. Natural forests.

The new layer, developed in collaboration with the Science Based Target Network, identifies natural forests that have not been significantly altered since 2020. This is important for monitoring losses in virgin forests.

5. Intact Forest Landscapes (IFL).

This layer represents large, continuous areas of forests that have not been significantly impacted by humans. It is key to the conservation of biodiversity and ecosystem services.

6. Tree plantations

The updated Spatial Database of Planted Trees (SDPT) provides information on the location and types of tree plantations, including forest plantations and agroforestry. This allows to distinguish natural forests from artificially created plantations.

7. Fires.

The fire layer provides data on active fires, updated daily, allowing you to track their impact on forest ecosystems.

8. Land use concessions.

This layer contains information on licensed areas for oil palm, timber, rubber and other crops, allowing to analyze the impact of commercial land use on forests.

9. Land use and protected areas.

GFW provides data on the boundaries of national parks, nature reserves and other protected areas, which is important for planning conservation measures.

10. Climate layers.

These layers include data on carbon stocks, emissions from deforestation, and other climate indicators, which allows assessing the impact of forest changes on the global climate.

It should be noted that the developers of the resource continue to work carefully on the platform, so the available GFW data is constantly updated.

Application in Ukraine

In 2022–2024, ecologists used GFW to track the massive reduction in forest cover in combat zones in eastern Ukraine, in particular in the Luhansk and Kharkiv regions, which became the basis for the formation of protection strategies for the post-war period.

Functions and capabilities of Global Forest Watch

Deforestation monitoring. One of the main functions of GFW is to provide operational information on deforestation in near real time. The system uses satellite data to detect unauthorized deforestation and other types of violations. For example, by analyzing satellite images, it is possible to track changes in forest cover and determine the extent and nature of deforestation.

Assessment of the state of forest ecosystems. The platform also allows assessing the state of forest ecosystems, including the level of degradation, fire, and changes in biodiversity. This data is important for decision-making at the local and global levels to protect forests and ensure sustainable development.

Forecasting and modeling. Through the integration of analytical tools and big data, GFW is able to predict possible future changes in forest cover by analyzing current trends and taking into account various factors such as climate change, urbanization, and agriculture. This allows for more accurate forecasts and strategic planning for forest conservation.

Public involvement. One of the unique features of Global Forest Watch is the ability to engage the public in forest monitoring. Each user can access a forest map and even submit a report on illegal forest-related activities. This promotes transparency and increases the level of responsibility among all participants in the environmental process.

Determining the impact of climate change. GFW is also actively using climate change data to assess how changes in temperature, precipitation and other climate factors affect forest ecosystems. This allows us to better understand environmental threats and develop adaptation strategies.

GLAD alert systems (Global Land Analysis and Discovery, <https://glad.umd.edu/gladmaps/globalmap.php#>)

In the context of rapidly increasing threats to forest ecosystems, including illegal logging, fires, and land use changes, there is a need to implement high-tech systems for rapid detection of changes in forest cover. One of the most effective of these systems is GLAD Alerts, which provides prompt notification of forest loss using satellite data. They were developed by the GLAD Laboratory at the University of Maryland in collaboration with NASA, USAID, Google and other organizations, and are implemented globally through the GFW platform.

GLAD-L is a remote sensing system that analyzes NASA's Landsat satellite images and GLAD-S2 is a system that uses a similar methodology to GLAD-L but is sourced from the European Space Agency's Sentinel-2 satellites.

Purpose and Functionality of GLAD

The systems generate weekly alerts on forest loss based on the comparison of images for different dates. The main goal of GLAD Alerts is to warn people about potential deforestation, although GLAD also detects additional disturbances such as cycles of plantation rotation, forest degradation due to fires and storms, and natural changes such as landslides and windstorms.

The systems work on the following principle:

- Receiving high-quality satellite imagery.
- Data processing using machine learning algorithms.
- Determining changes in light reflection from the earth's surface, which are typical of deforestation or fires.
- Verification of results, generation of geo-referenced alerts.



Fig. 2. Algorithm for responding to deforestation alerts [5]

Geographic coverage and detail

GLAD Alerts covers a large part of the forest regions of the tropical, subtropical and temperate zones, including:

- Amazon;
- Central Africa;
- Southeast Asia;
- Partially – Ukraine, especially Polissya and the Carpathians.

Alerts are generated with a spatial resolution of 10-30 meters, which allows detecting even small areas of forest loss – within 0.1-0.5 hectares.

Integration with other tools

GLAD Alerts is one of the basic layers of the Global Forest Watch platform, where users can:

- Track deforestation in specific regions online.
- Receive email alerts.
- Export data for further analysis in GIS systems.
- Integrate GLAD into their own applications via API.

In addition, GLAD is often combined with other layers, such as VIIRS Active Fires, biomass data, protected areas, and concession boundaries, for a comprehensive assessment of environmental processes.

Practical value and application

GLAD Alerts are actively used:

Government agencies – for prompt response to illegal logging, verification of compliance with environmental legislation, and assessment of forest policy effectiveness.

Civil society organizations and journalists – to expose environmental violations, particularly in countries with high levels of corruption in the environmental sector.

Businesses – to control supply chains of raw materials (including timber and agricultural products).

Scientists – as a source of spatial data to study landscape change, climate impacts, and biodiversity loss.

Application in Ukraine

Despite the fact that Ukraine is not the main focus of the GLAD system, the GFW platform shows significant activity of forest cover changes, especially in war zones and after fires (Fig. 3). GLAD Alerts are used in studies of the impact of war on forest ecosystems, identification of illegal logging in the Carpathians and other hard-to-reach regions.

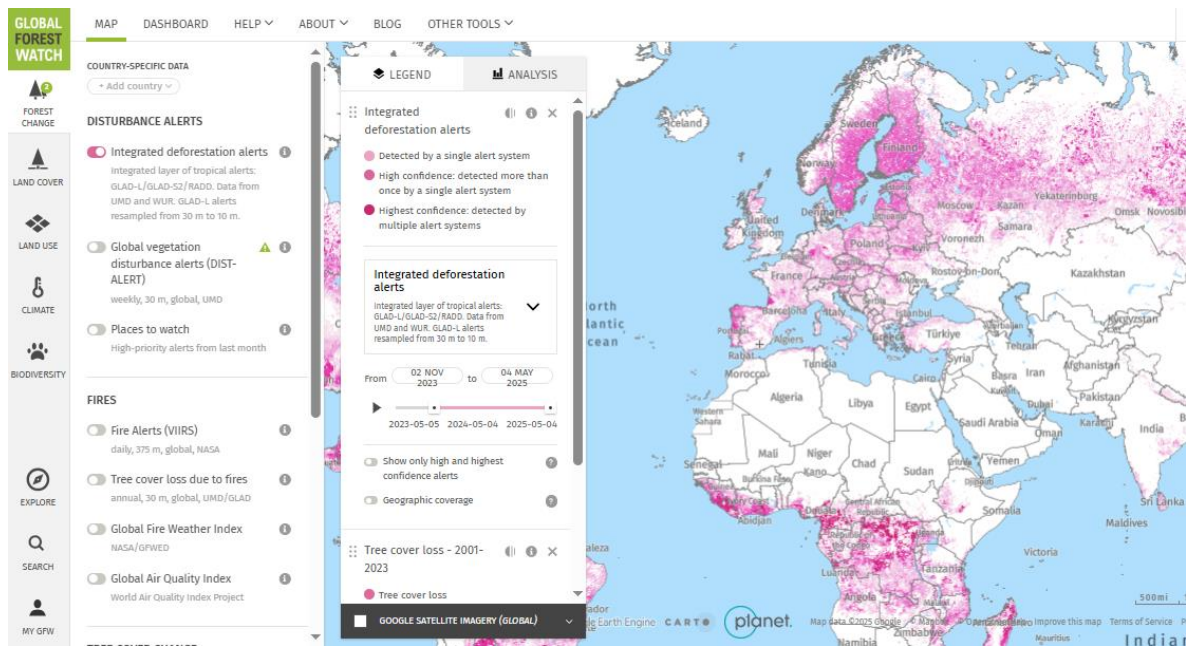


Fig. 3. Interactive map of GLAD Alerts

Limitations of the GLAD system

Despite its advantages, the system has certain limitations:

- Dependence on image quality (the presence of clouds, smoke screen, etc. can affect the accuracy).
- Insufficient accuracy for very small changes (less than 0.1 hectares).
- Limited coverage in taiga, semi-desert and regions with high snow cover.

Development prospects

It is expected that in the coming years the GLAD system will be improved by:

- Involvement of images from new satellites with higher resolution.
- Integration with deep learning algorithms.
- Expansion of geographical coverage (in particular, Europe and Central Asia).

Automation of forecasting future deforestation

These updates will allow us to respond even more effectively to environmental challenges and contribute to the formation of a new environmental ethics of natural resource consumption.

Global Forest Change (GFC) is a system that has been providing a comprehensive mapping assessment of forest cover changes on the planet at high spatial resolution since 2000. Developed by scientists at the University of Maryland's Remote Sensing Laboratory under the direction of Professor Matthew Hansen, GFC is an important tool for retrospective and ongoing analysis of forest loss and gain.

GFC differs from GLAD Alerts in that it is not an operational monitoring system, but instead provides annually updated data on overall changes in forest cover, including:

- Tree cover loss.
- Tree cover gain.
- Base year tree cover.
- Tree canopy density.

Data sources

The GFC system is based on:

- Landsat 5, 7, 8 satellite images covering the period since 2000.
- Classification algorithms applied on the basis of pixel analysis at a scale of 30×30 meters.
- Processing using Google Earth Engine, which ensures fast processing of hundreds of terabytes of satellite images.

Main GFC products

Several key global maps are produced within the GFC, including:

- Tree Cover 2000: shows the initial state of forest cover at the beginning of the 21st century.
- Forest Loss (2001-2023): annual maps of tree cover loss.
- Forest Gain (2000-2012): a map of forest growth over a 12-year period.
- Tree Canopy Density: a graded map of tree canopy density in %.

These layers are integrated into Global Forest Watch and are available for free viewing, downloading or use in GIS systems.

Practical implications

The GFC system provides a scientific basis for:

- Creating national reports on forest cover change.
- Identification of deforestation “hot spots” for further monitoring.
- Building carbon balance models.
- Analyzing long-term trends in forest degradation or regeneration.
- Environmental planning and development of climate change policies.

The unique advantage of the GFC is its versatility and stability over time, which allows comparing forest changes with high accuracy over different years and regions.

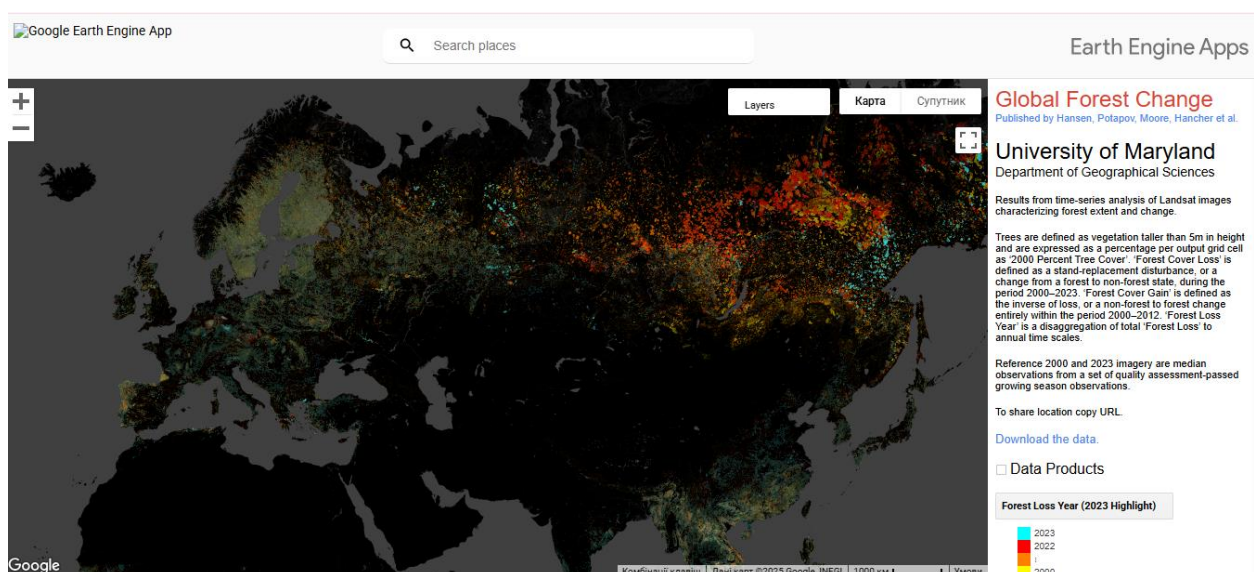


Fig. 4. Interactive map of Global Forest Change [6]

Application in Ukraine

GFC makes it possible to estimate the scale of forest loss in Ukraine since 2001, in particular:

- Reduction of areas due to intensive deforestation in the Carpathian region.
- Forest degradation due to fires in Polissia.
- Forest loss in the war zone after 2022.

GFC data is widely used in domestic scientific research and is also included in international reports (FAO, Forest Europe).

Limitations of the system

Despite its accuracy, GFC has some limitations:

- Data is updated annually, so it does not capture changes in real time.
- The classification does not always accurately distinguish between forest types or causes of loss.
- The system does not cover the growth after 2012 separately by year (currently it is one total layer).

The Global Forest Change system is a fundamental source of geospatial information on the dynamics of forest cover on Earth. It complements operational monitoring systems (such as GLAD), forming a holistic knowledge base for assessing the ecological state of the planet, analyzing anthropogenic impacts, and supporting environmental governance.

The **Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI, <https://gedi.umd.edu/>)** is an innovative NASA satellite mission aimed at measuring the vertical structure of forests around the planet using active laser technology (lidar). Its goal is to provide critical data to understand the role of forests in the Earth's carbon cycle, estimate the biomass of aboveground vegetation, and support global climate conservation efforts.

GEDI is one of the first missions to provide large-scale 3D mapping of forest structure, which allows better estimates of carbon stocks, especially in tropical regions.

How it works

GEDI is based on lidar sensing, a technology that uses laser pulses to measure the time of their return after reflection from the earth's surface and various forest elements (crowns, trunks, soil surface). The system was installed on the International Space Station (ISS) in 2018.

Key technical characteristics:

- Laser frequency: 242 sensations/second.
- Track width: ~25 m.
- Distance between tracks: ~600 m.
- Vertical profile depth: ~50 m.

Main GEDI products

The mission provides accurate data on:

- Canopy Height.
- Vertical Canopy Profile.
- Aboveground Biomass Density.
- Ground Elevation.

The data are open and available through NASA Earthdata, as well as through Google Earth Engine, where they can be combined with other environmental layers.

Value in environmental monitoring

GEDI is of exceptional importance for:

- *Global carbon balance assessments.* Thanks to accurate measurements of biomass, it is possible to determine how much carbon is stored in forests or released through deforestation.
- *Mapping vulnerable regions.* For example, the tropical forests of the Amazon, Africa, and Southeast Asia.

- *Supporting REDD+ programs, climate models and reporting under the Paris Agreement.*
- *Scientific research on climate change, forest degradation and restoration.*

Application of GEDI in Ukraine and the world

Although GEDI has uneven global coverage (due to the ISS orbit), its data are already actively used for:

- Calculating the biomass of the Carpathian forests.
- Assessment of forest ecosystem services within the framework of environmental management.
- Validation of ground-based forest inventory data.

Limitations of the system

- *Spatial incompleteness.* Due to the limited number of laser traces, only about 4% of the planet's surface—with selective geometry—is covered.
- *Time limits.* The main phase of the mission lasted from 2019 to 2023; further data updates depend on mission extensions or new launches.
- *Sensitivity to cloud cover, atmospheric conditions.*

Perspectives

The GEDI mission was a technological breakthrough in global forest monitoring. It is expected that its results:

- Will be integrated into IPCC climate scenario models.
- Become the basis for further 3D missions of NASA and ESA.
- Strengthen cooperation between science, policy and natural resource management.

Global Land Cover (GLC) is a generic name for a collection of global satellite mapping products that show land cover types across the planet's surface. GLC maps categorize the Earth's surface by certain types of use or natural state (forests, cropland, water, human settlements, grasslands, etc.) and are crucial for environmental analysis, land use planning, monitoring environmental change, and biodiversity assessment.

GLC systems are built on the basis of long-term remote sensing data, mainly from MODIS, SPOT, Landsat, Sentinel-2 satellites, and processed using machine learning, expert validation and cloud computing methods.

GLCs are a fundamental source of spatial information for assessing the status, dynamics and trends of forest cover changes at regional and global levels. They allow to:

- Identify forest areas (Natural forest, Plantation, Forest-Shrub mosaic).
- Determine changes in forest cover over time (defoliation, degradation, restoration).
- Analyze the relationship between deforestation, urbanization and agriculture.
- Assess the fragmentation of forests, which is a critical indicator of biodiversity loss.
- Map the boundaries of protected areas and assess the effectiveness of forest conservation.

Forest types in GLC products

Different GLC maps classify forest cover types in different detail. For example: MODIS MCD12Q1 (IGBP classification):

- Evergreen Needleleaf Forest.
- Evergreen Broadleaf Forest.
- Deciduous Needleleaf Forest.
- Deciduous Broadleaf Forest.
- Mixed Forest.

ESA WorldCover:

- Tree Cover (High/Low density).
- Shrubland.
- Mosaic vegetation (woody + herbaceous).

GLC-FCS30:

- Natural Forest.
- Plantation Forest.
- Sparse Trees.
- Degraded Forest.

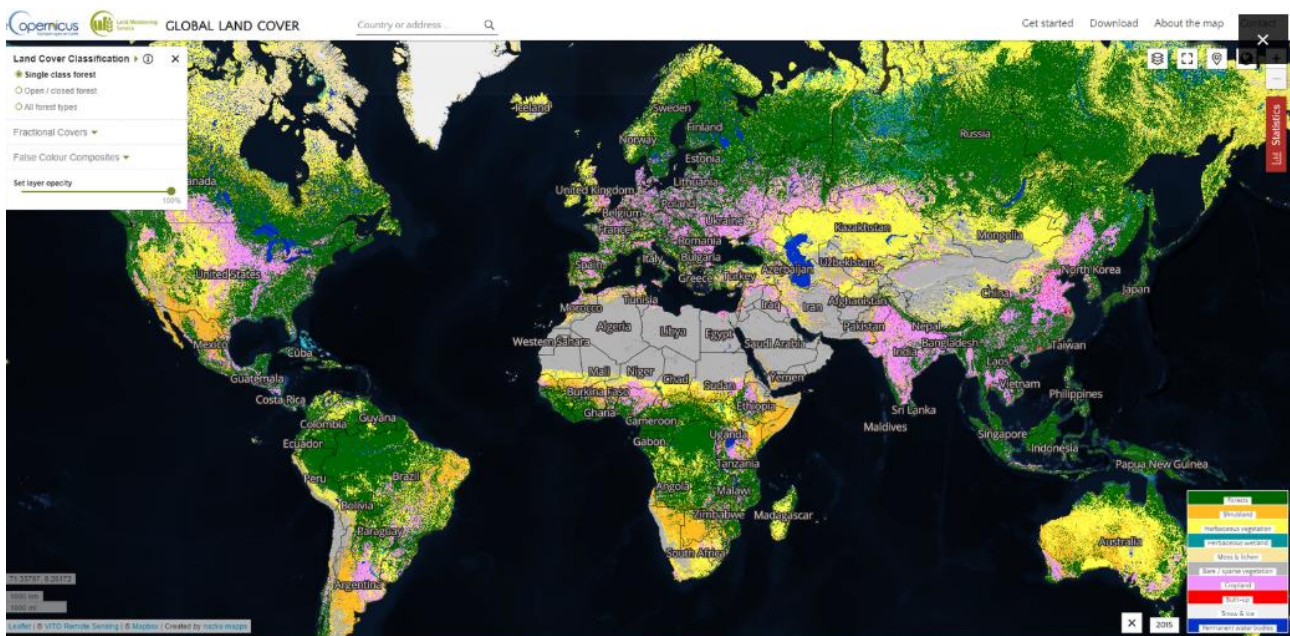


Fig. 5. Interactive map of Land Cover Viewer [7]

Advantages of GLC in forest analysis

- *Global consistency* – allows for comparison of forest cover between countries.
- *Regular updates* (annually or at intervals of several years).
- *High spatial and temporal resolution* – from 10 to 30 m (in the latest products).
- *Integration with indices of vegetation condition (NDVI, EVI), biomass (GEDI), deforestation (GLAD).*

Disadvantages and challenges

- Limited accuracy in transitional ecosystems (forest-shrubland, mosaic landscapes).
- Confusion between natural forests and plantations.
- Degraded or partially deforested forests are not always distinguished.
- Assessment does not reflect vertical structure (solved, for example, by GEDI).

Implications for Ukraine

In the context of Ukraine, GLC maps are important for:

- Detection of illegal logging in the Carpathians and Polissia.
- Assessing the impact of hostilities on forests in frontline areas.
- Planning reforestation, restoration of forests after fires and degradation.
- Providing input data for forest inventory and satellite monitoring.

Global Land Cover is not only background information for maps, but also an important analytical tool that allows you to:

- Identify trends in forest dynamics.
- Plan forest conservation and restoration.
- Inform sustainable forest management policies.

The combination of GLC, GLAD, GFC, GEDI and MODIS provides a comprehensive satellite framework for integrated forest monitoring in the face of global change.

The **Climate Change Initiative – Land Cover (CCI LC)** is a global product of the European Space Agency (ESA) under the Climate Change Initiative program that provides long-

term, spatially consistent land cover maps from 1992 to 2020. Its main purpose is to provide high-quality input data for climate models and analysis of land use changes that affect climate processes.

CCI LC is one of the few products that:

- covers more than 25 years of data,
- provides global coverage with the same methodology,
- provides data in GIS format compatible with climate models.

Technical specifications

- *Time frame:* 1992-2020 (annual maps).
- *Resolution:* 300 m.
- *Data source:* AVHRR, MERIS, SPOT-VGT, PROBA-V.
- *Classification:* up to 22 land cover classes (according to UN-LCCS).
- *Formats:* NetCDF, GeoTIFF, re-classified sets (PFT, IPCC, FAO, GLC2000 compatible).

Features in the context of climate change

CCI LC is unique among other GLC products because:

- *Suitable for climate modeling:* data are integrated into GCM, DGVM, Earth System Models.
- *Takes into account temporal and spatial consistency* – important for long-term trends.
- *Supports land-use change scenarios (LULUCF) under the IPCC.*
- *Informs the inventory of GHG emissions associated with changes in forests, grasslands, and cropland.*

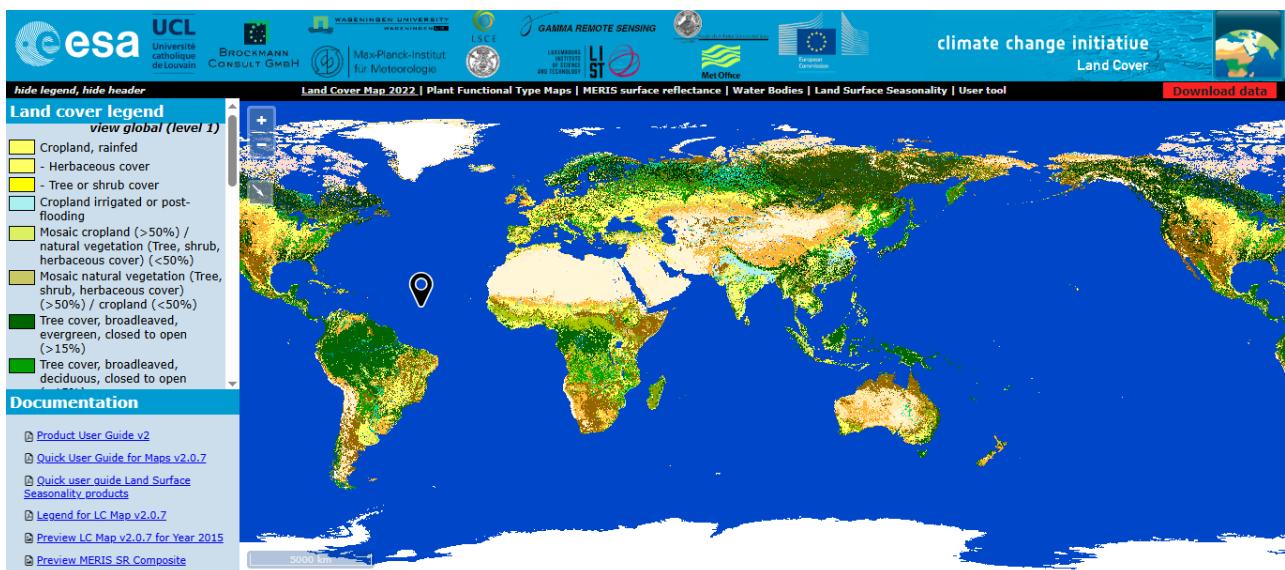


Fig. 6. Interactive Land Cover map 2022 [8]

Applications in ecology and forests

CCI LC is actively used for:

- Assessment of deforestation and transformation of forests into agricultural land.
- Identification of ecosystem degradation trends.
- Mapping of natural and anthropogenic landscapes in the long term.
- Assessment of the effectiveness of environmental policies in the fight against climate change.
- Supporting national reports on REDD+, UNFCCC, CBD, SDGs.
- Implications for forest monitoring

In forest ecology, CCI LC allows you to:

- Track the transformation of forest types (e.g., from broadleaf to mosaic or degraded).

- Analyze the level of stability of forest cover in a time frame (27+ years).
- Support carbon balance modeling by analyzing transitions between cover types.
- Identify regions at high risk of forest loss due to climatic factors (droughts, fires, agricultural expansion).

Advantages:

- Long-term series (1992-2020).
- Consistent methodology for all years.
- Classification in accordance with international standards (FAO, IPCC, UNFCCC).
- Readiness for integration into climate models.

Limitations

- Lower resolution (300 m) compared to modern GLC products (10-30 m).
- Difficulty for detailed regional analysis (not suitable for site-specific monitoring).
- Does not take into account the vertical structure of the forest (unlike GEDI).

Application in Ukraine

CCI LC can be used for:

- Assessment of historical changes in forest cover in the Carpathians, Polissia and Steppe.
- Building models of land use impacts on CO₂ emissions as part of climate reports.
- Supporting the national land inventory (LULUCF) in accordance with EU requirements.
- Developing climate change adaptation strategies in the environmental sector.

CCI LC is not just a land cover map, but a climate-oriented dataset that helps to understand how ecosystem transformation affects climate and vice versa. It is a strategic resource for long-term environmental modeling, analysis of forest dynamics, and development of sustainable environmental management policies.

Global PALSAR-2/PALSAR/JERS-1 Mosaics and Forest/Non-Forest Maps

Optical satellite data, despite being highly informative, has a key limitation: sensitivity to cloud cover and insufficient permeability due to dense vegetation. In such conditions, radar (SAR) data operating in the microwave range becomes an indispensable tool for forest monitoring. Global products based on the Japanese satellites JERS-1, ALOS PALSAR, and ALOS-2 PALSAR-2 are particularly well suited for this purpose.

The products are:

1. Global SAR Mosaics

Mosaics are stitched together radar images of the earth's surface that cover the entire planet. They are created at annual or five-year intervals.

Main characteristics:

- *Resolution*: 25 m (for most PALSAR/ALOS-2 data).
- *Image types*: HH and HV polarization (horizontal-horizontal and horizontal-vertical).
- *Coverage*: annual mosaics since 2007.
- *Processing*: radiometric correction, georeferencing, brightness normalization.

2. Global Forest/Non-Forest Maps

Forest/non-forest maps are created based on L-band backscatter analysis, which allows to clearly identify the presence of woody vegetation.

- *Classification criterion*: Threshold value of brightness (backscatter) of HH and HV channels.
- *Accuracy*: > 85% (tested with field and optical data).
- *Frequency*: annual (for example, 2007-2010, 2015-2022).
- *Data format*: GeoTIFF, 25 m.



PALSAR-2 Global Forest / Non-forest Map "2020"

2021 | 2020 | 2019 | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 | 2010 | 2009 | 2008 | 2007

Please click on an area of the map to download the data.

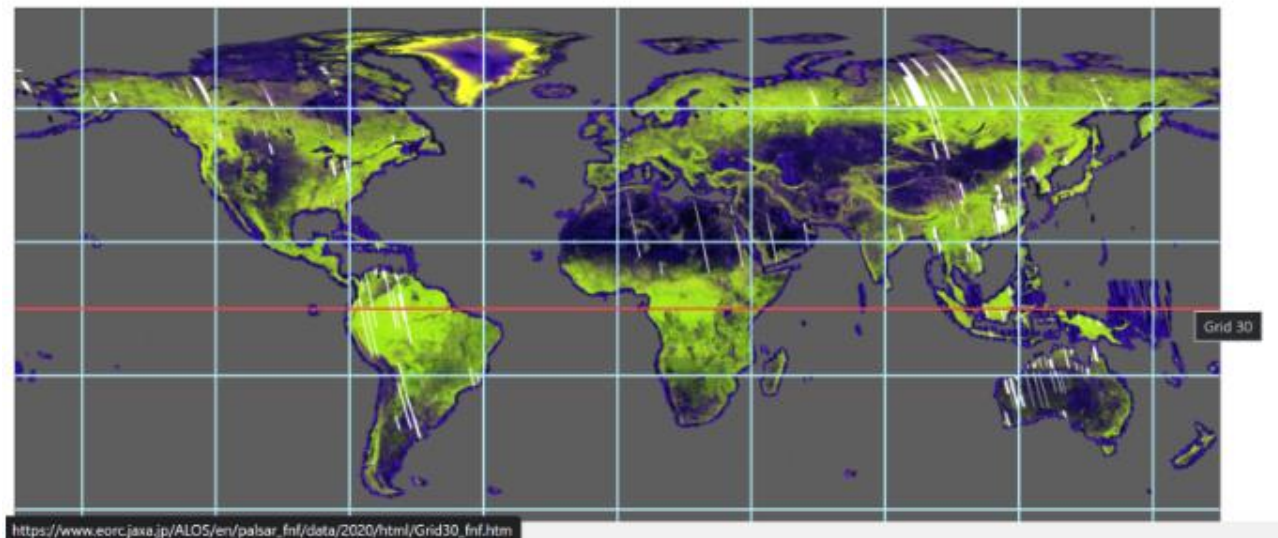


Fig. 7. Global PALSAR-2/PALSAR/JERS-1 Mosaics and Forest/Non-Forest Maps download page [9]

Examples of application in ecology

- Monitoring of tropical rainforests where optical sensors have low efficiency due to cloud cover.
- Assessment of changes in forest area – detection of deforestation, degradation, reforestation.
- Modeling carbon stocks, especially in the framework of REDD+.
- Creation of national forest inventories in developing countries.
- Control over forests in conditions of conflict or limited access – for example, in occupied areas.

Technological features

- SAR technology allows you to “see through the clouds” – ideal for continuous monitoring in equatorial zones.
- L-band is optimal for detecting woody vegetation, as it penetrates through the leaves to the trunks.
- Automated classification using thresholding and machine learning algorithms.
- Availability and use

Forest mosaic and map products are available for free download through portals:

- JAXA Earth Observation Center (EORC).
- ASF DAAC (Alaska Satellite Facility).
- Google Earth Engine.

Global SAR Forest/Non-Forest mosaics and maps based on PALSAR and JERS-1 satellites are a powerful tool for accurate, weather-independent environmental monitoring. Due to their high spatial resolution, data stability and open access, these products are widely used in global forest science, climate analysis and sustainable environmental management practices.

These products provide highly accurate land surface mosaic maps and forest/non-forest classifications, which are extremely valuable for assessing changes in forest cover, carbon stocks, and natural resource management.

GlobalTreeSearch

Biodiversity conservation is a key objective of modern environmental science, and tree species form the basis of many of the Earth's ecosystems. However, until recently, there was no single global list of all tree species. This gap has been filled by the GlobalTreeSearch project, the first and most comprehensive tree database, including scientific names, distribution by country, and taxonomic information. Developed by Botanic Gardens Conservation International (BGCI), this resource is a critical tool for conservation planning, assessing extinction risks, and supporting sustainable forest management. The platform was created in 2017, but the database is constantly updated as new information becomes available.

The content of the database

GlobalTreeSearch includes:

- *The scientific name of each species* (family, genus, species).
- *Synonymous names* (according to Kew, Tropicos, IPNI).
- *Geographical distribution* – countries or territories where the species is autochthonous or naturalized.
- *Indication of endemism* – the uniqueness of a species for a particular country.
- *Information on conservation status* (links to the Global Tree Assessment database).

Applications in ecology

GlobalTreeSearch serves as a platform for many ecological and environmental tasks:

- Assessment of forest biodiversity in different regions of the world.
- Prioritize species protection (especially endemic or threatened species).
- Supporting reforestation programs, including the selection of locally adapted species.
- Comparison of regional and global phytodiversity.
- Scientific research in the field of phytogeography, evolution, and forest ecology.

Integration with other information systems

GlobalTreeSearch is closely related to:

- *GlobalTreeAssessment (GTA)* – a project that assesses the risk of extinction of each tree.
- *IUCN Red List* – providing information on the conservation status.
- *BGCI ThreatSearch* – a database that catalogs threats to tree species
- *PlantSearch & GardenSearch* – data on tree conservation in botanical gardens.

Data examples

Ukraine: 102 tree species, of which 10 are introduced and 6 are endemic (Fig. 8).

Brazil: more than 8000 tree species, the largest number of any country in the world.

Globally: ~60,000 trees, of which more than 58% are found in only one country – a high level of endemism.

Technology infrastructure

GlobalTreeSearch is available as:

- An interactive web interface searchable by name or country.
- Tabular data in CSV/Excel format.
- Visualizations of distribution maps.
- API-access for integration into GIS projects and botanical databases.

GlobalTreeSearch is a unique information resource that has become a basic standard in global tree conservation initiatives. Its application in ecology delivers precise data for analyzing forest biodiversity, planning conservation strategies, and supporting sustainable forest management. It opens up new opportunities for synthesizing biological, geographic, and environmental information in one space.

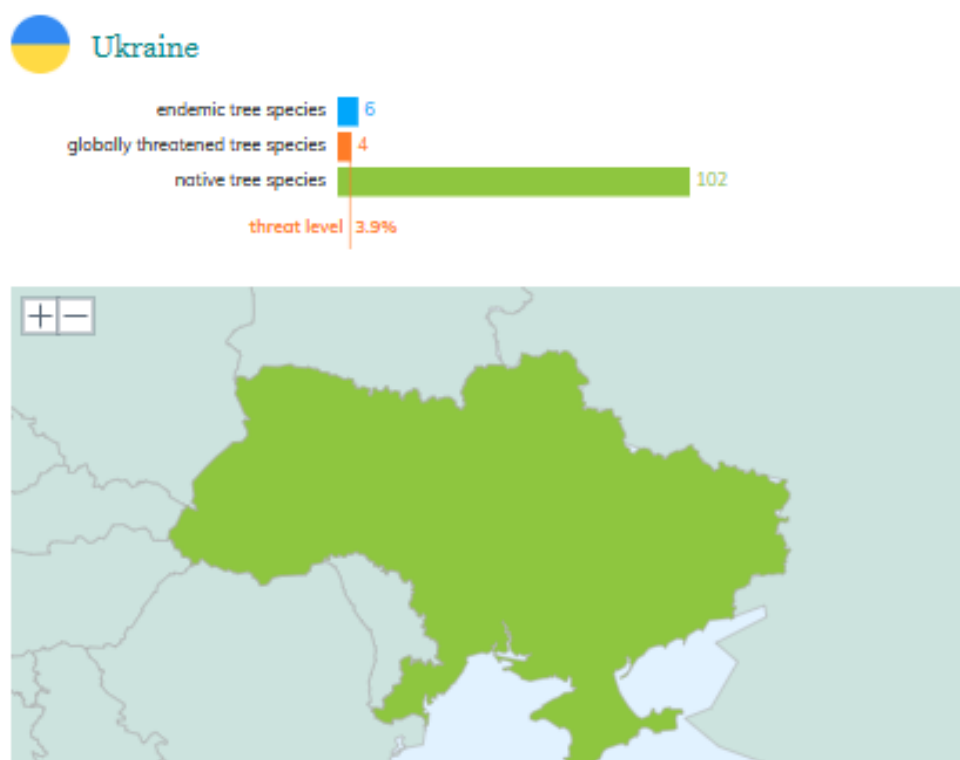


Fig. 8. Tree database for Ukraine [10]

Conclusion

It is important that modern forest cover monitoring solutions allow not only to record the facts of changes, but also to analyze their causes and consequences, which is key to the formation of long-term sustainable development strategies.

1. Mikhailov D. Since the beginning of the full-scale war, Russia has destroyed more than 60 thousand hectares of forest on TOT – investigation. Social. News. URL: <https://suspilne.media/722493-vid-pocatkupovnomasstabnoi-vijni-rosia-znisila-ponad-60-tisac-gektarivlisu-na-tot-rozsliduvanna/> (access date: 05.05.2025).
2. Public report of the Head of the State Agency of Forest Resources of Ukraine for 2023. URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2023/zvit_lis_%202023.pdf (access date: 05.05.2025).
3. Criminal Procedure Code of Ukraine: Law of Ukraine dated 13.04.2012. № 4651-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4651-17#Text> (access date: 05.05.2025).
4. <https://www.globalforestwatch.org/map/>
5. Weisse M., Pickens A. GLAD Deforestation Alerts, Explained https Amy: URL: <https://www.globalforestwatch.org/blog/data-and-tools/glad-deforestation-alerts/>
6. <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change#bl=off;old=off;dl=1;lon=30.722656250000007;lat=49.744921505576755;zoom=3;>
7. <https://www.nazka.be/en/realisations/landcoverviewer>
8. <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>
9. https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/fnf_e.htm#description
10. <https://www.bgci.org/resources/bgci-databases/globaltree-portal/country-search/?c=UA>

DESIGNING INFORMATION SYSTEMS FOR DETERMINING THE CARBON BALANCE OF FORESTED AREAS

Lagun Andrii
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
andrii.e.lahun@lpnu.ua

Abstract. This paper presents an analysis of methods for designing information systems for ecological monitoring of forested areas to determine the carbon balance of ecological systems, which enable effective responses to challenges related to environmental safety. Disruptions to the carbon balance of ecological systems negatively affect climate stability and pose a threat to global warming on the planet. The use of satellite imagery, ground sensors, and remote sensing tools for environmental monitoring allows for rapid adjustments in carbon flows and the creation of databases to predict the impact of climatic factors on forest ecosystems. To prevent anthropogenic impacts and implement effective carbon balance management, it is necessary to deploy computer monitoring systems that can track changes in ecological systems, forecast risks to global environmental security, and respond accordingly. The analysis of the carbon cycle of a specific area showed that forests are one of the most important elements in absorbing carbon dioxide and ensuring the atmosphere with quality air. Modern information technologies can be effectively used for automated monitoring and improving the safety of the surrounding environment.

Keywords: information system, monitoring, carbon cycle, environmental protection, climate neutrality, forested area, decision-making, carbon dioxide.

Introduction

In the current context, a highly relevant issue concerning the existence of human society on the planet is the response to global warming, which is determined by the impact of climate changes, the preservation of natural resources, and addressing environmental challenges. Special attention is given to research aimed at creating tools for analyzing, monitoring, and forecasting the impact of human activity on the environment.

Forest ecosystems are considered one of the key factors in stabilizing the climate, as they play an important role as natural regulators of the carbon cycle. They are not only a source of oxygen and a natural carbon sink but also ensure the stability of climatic processes. Due to the anthropogenic impact of society, such as deforestation, changes in forest composition, and degradation of forest lands, there has been a significant increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. To address the issue of the carbon balance, it is necessary to implement innovative approaches to the management, assessment, and monitoring of forest ecosystems, which improve environmental safety.

One of the most promising approaches is the combination of modern technologies from various fields, including the environmental branch and information technologies, which enable the development of information systems for collecting, processing, and analyzing data on carbon flows. The use of such systems, based on international methodologies, including the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change, allows for the assessment of the ecological condition of forestry, monitoring forest changes, and forecasting the consequences of anthropogenic impact. It creates new opportunities for making effective decisions in addressing climate change issues at the local, national, and international levels. The implementation of forest monitoring information systems, built using new information technologies and artificial intelligence, allows for the collection of reliable data for modeling ecological changes and supporting sustainable development initiatives.

The main goal of the research presented in this paper is to analyze the principles of

operation of existing systems and define the principles for designing interactive information systems that provides effective opportunities for determining and analyzing the carbon balance of forest ecosystems based on recognized international methodologies. In the next chapters is conducted a review of modern methodologies and systems used for monitoring the carbon balance of forest ecosystems, with a primary focus on the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The information model of the forest monitoring system for research purposes takes into account key indicators of the carbon cycle of forest ecosystems, processes and analyzes ecological data in real-time, and allows for the generation of reports.

1. The problems of ecological sustainability of forest ecosystems and ways to impact forest security

The task of developing information systems for monitoring the carbon balance of forest ecosystems, as discussed in this paper, is relevant not only for the scientific community but also for a wide range of professionals interested in solving environmental issues. The methods for addressing this task open up new opportunities for analyzing, forecasting, and assessing the effectiveness of environmental measures aimed at combating climate change. Such systems can be particularly important for government institutions involved in monitoring natural resources and for international organizations addressing global issues related to reducing greenhouse gas emissions and implementing a carbon-free economy on a global scale [1].

Nowadays with the development of humanity, there is not only a rapid increase in the positive impact of information technologies on life but also an increase in the impact of anthropogenic activities on the environment, creating serious challenges for the global ecological system of planet Earth. It is important to note that one of the most significant elements of the natural environment is forest ecosystems, which play a key role in the carbon cycle of the planet by regulating the concentration of greenhouse gases in the atmosphere and maintaining ecological balance (fig. 1).

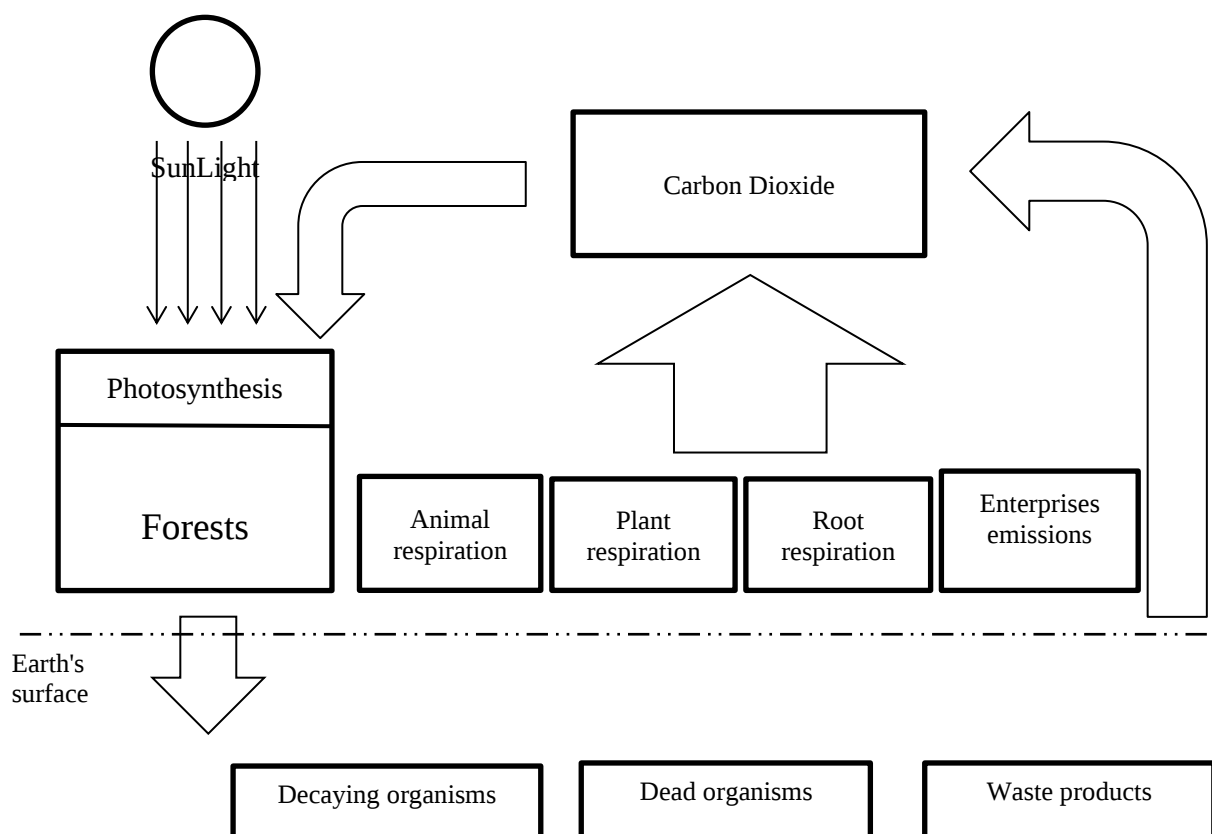


Fig. 1. The carbon cycle

Human impact on forest cover, through deforestation, degradation of forested areas, and climate change processes, can disrupt natural carbon absorption and emission processes. In this context, the need for detailed monitoring and assessment of the carbon balance of forest ecosystems becomes an extremely relevant issue. Addressing this issue enables the sustainable development of society and enhance the resilience of living organisms to life processes related to climate change. For analyzing and assessing carbon flows worldwide have been developed methodologies, the practical implementation of which requires the creation of automated environmental monitoring information systems. These systems must be capable of ensuring the accuracy, timeliness, and accessibility of data for scientists, ecologists, and governing bodies to quickly respond to global challenges [2]. Such systems allow for monitoring the current state of forest ecosystems and forecasting changes to make environmentally justified decisions.

Disruptions in the carbon cycle on the planet can lead to increased carbon dioxide emissions into the atmosphere, which significantly impact climate balance. Therefore, the implementation of information systems that allow for precise measurement and analysis of carbon flows is a pressing need for society. Ensuring the monitoring and assessment of the carbon balance of forests provides the opportunity to create an ecologically balanced system. In this system, automated methodologies allow for the rapid analysis of large volumes of data obtained from satellite imagery, ground sensors, and remote sensing tools. Such approaches can quickly adjust carbon flows and create databases for forecasting the impact of climatic factors on the condition of forest ecosystems.

Another important application of environmental monitoring systems is their integration into decision-making processes by government regulatory bodies, which enable the implementation of more effective measures for forest conservation, land-use regulation, and the reduction of greenhouse gas emissions [3].

In Ukraine, there are frequent threats to ecological security due to the preservation of ecological sustainability of forest ecosystems, which serve as sources of carbon dioxide absorption. A prime example of serious ecological threats is forest fires, which destroy thousands of hectares of forests. Fires have a significant impact on the carbon balance, as large amounts of carbon dioxide are released into the atmosphere during the combustion of wood and organic matter. Other threats from fires include soil degradation, as the destruction of forest cover leads to a reduction in the amount of organic matter in the soil and a loss of fertility; a decrease in biodiversity due to the destruction of habitats for many species of flora and fauna; and a reduced ability of forest ecosystems to regenerate.

The problem of fires is exacerbated by anthropogenic factors, including intentional grass burning, negligence during leisure activities in forests, and a lack of sufficient control over fire safety measures. To prevent anthropogenic impacts and effectively manage the carbon balance, it is necessary to implement computer monitoring systems that enable the timely tracking of changes in ecological systems, forecasting risks, and responding to them.

The use of remote sensing methods, high-quality satellite imagery, and sensors for detecting temperature anomalies in environmental monitoring information systems contributes to the rapid detection of fires and allow for the assessment of their negative impact on forest ecosystems.

It is important to note that forest fires also have long-term negative consequences, as forest restoration takes decades. During this period, the carbon balance remains disrupted, as young forests absorb significantly less carbon dioxide. Therefore, there is a need for forest restoration measures through the planting of new trees and the implementation of management decisions aimed at restoring and preserving ecological systems.

2. Comparative analysis of modern environmental monitoring systems

Modern carbon balance monitoring information systems are used in forest resource management and climate change adaptation. Various approaches include the collection and analysis of data to assess the carbon content in soils and biological compounds associated with human

activity. The use of ecological monitoring systems allows for determining the current state of ecosystems, observing the dynamics of changes in forest cover, and forecasting the impacts of anthropogenic factors and climate change-dependent processes. As an example, due to the difficulty of accessing forest ecosystems in tropical forests, carbon balance studies use methodologies that involve satellite imagery to assess carbon stocks in remote areas.

An important aspect of developing carbon balance monitoring information systems is the analysis of large volumes of data at high speed. The necessary information for monitoring is selected from sensors during remote sensing process, satellite imagery, and field studies. It is also crucial to use standard methodologies from the Intergovernmental Panel on Climate Change, which provides guidelines for calculating greenhouse gas emissions and carbon stocks. For investigations are also applied machine learning algorithms, which help identify trends based on historical data and provide the ability to model future climate changes and predict carbon balance shifts. The analysis and processing of satellite imagery using machine learning technologies allow to identify forest areas that may be logged and assess carbon losses due to natural disasters.

One of the main challenges in implementing information systems for determining carbon balance and climate change is the need for continuous data updates and processing large volumes of information. It is important to note that monitoring systems for forest ecosystems have the following requirements.

1. The system should enable the forecasting of future changes in carbon balance based on modeling climate change stages and anthropogenic impacts.
2. The system must monitor parameters of forest ecosystems such as biomass, vegetation types, temperature, humidity, and soil composition.
3. All calculations should use global methodologies related to carbon stock assessment and the characteristics of aboveground and belowground biomass.
4. To accurately track changes in carbon stocks and monitor the state of forest ecosystems are required continuous data updates.
5. The system must have the capability to generate reports and conduct ongoing data analysis to support decision-making regarding forest conservation and their carbon potential. Visualization of changes in carbon balance should occur in real-time.

One of the well-known geographic information systems (GIS) is Global Forest Watch, which monitors forest ecosystems worldwide in real-time using satellite imagery and data on changes in forest cover [4]. This system features interactive maps that display changes in forest cover and information on carbon emissions associated with deforestation. The web system can be used for analysis and reporting, providing specialists and organizations with the ability to assess the impact of changes on the carbon balance of forests.

The Global Forest Watch GIS allows real-time tracking of changes in forest ecosystems. The platform is free and open to all users. Data on forest changes, including tree loss and regrowth, are highly detailed. Another significant advantage of the information system is the ability to view maps, customize data layers for research, and conduct independent analyses. It also enables the monitoring of carbon emissions to analyze the carbon balance of forest ecosystems.

Despite significant advantages, the ability to analyze forest ecosystems using the Global Forest Watch GIS on a global scale reduces the accuracy of studies for local forest areas. As a result, some local forest characteristics or factors influencing the carbon balance may remain outside the scope of research. Additionally, the system's focus solely on satellite imagery introduces issues in processing speed due to delays in receiving information from satellites.

Worth noting that another geographic information system for monitoring forest ecosystems is Terra-i. It can track changes in natural environments and help assess the impact of anthropogenic factors on the environment. The platform uses artificial intelligence and satellite imagery to detect changes in territories, such as deforestation and agricultural land use. Data analysis is conducted every 16 days, so this GIS provides up-to-date information on ecological changes, including carbon emissions.

The biggest advantage of the Terra-i GIS is the use of artificial intelligence for the automatic detection of changes in forested areas, which simplifies and speeds up the data collection process. This environmental monitoring information system is accessible for research in many regions and is free to use. The primary focus of the system is on identifying areas of degradation and deforestation, which helps assess not only biomass loss but also carbon emissions. A downside of Terra-i GIS is its focus primarily on regions in South America, so its accuracy for other areas may be lower. Compared to the Global Forest Watch platform, the Terra-i system offers fewer tools for detailed analysis of biomass and carbon balance.

Another example of an effective information system for forest territory research is the Forest Carbon Monitoring Platform, which specializes in analyzing carbon emissions and changes in forested areas. It offers integration of various data sources and technical solutions for assessing the carbon balance [6]. Using satellite data, the platform provides models for estimating biomass and carbon balance indicators in different regions for forest resource management.

The Forest Carbon Monitoring Platform GIS is adapted for use by scientists, ecologists, government organizations, and companies. Its focus on biomass analysis of forested areas allows for more accurate calculations of carbon balance compared to other platforms discussed. The use of cutting-edge satellite technologies for data acquisition ensures high-precision information about changes in forest cover, and the integration of additional analytical tools within the system enables in-depth analysis and tracking of the impact of deforestation, fires, and other factors on carbon emissions.

The main drawbacks of the Forest Carbon Monitoring Platform are its reliance on the models used. This is because many indicators are calculated using models, and the accuracy of the data can vary depending on the selected parameters and the characteristics of the local areas. Additionally, due to the numerous additional research capabilities compared to the other monitoring systems discussed, the interface may be somewhat complex for users who are not well-versed in the platform's tools and functionalities.

3. Design of an information model and components of a forest monitoring system

The main purpose of the information model for monitoring forest territories is to analyze and assess the carbon balance of the ecosystem. The system should ensure the collection, processing, and visualization of data on carbon flows in forests, enabling effective natural resource management and informed decision-making. The developed model takes into account various parameters that reflect the processes of carbon absorption, accumulation, and emissions in forests, and is based on international methodologies for assessing the planet's climate balance.

For the research, the main focus was placed on the following indicators.

The primary quantity of reducing carbon in the atmosphere occurs through carbon absorption by trees. This indicator of reducing carbon reflects the amount of carbon absorbed by trees and accumulated in their biomass, which includes wood, leaves, and roots. By considering the age characteristics of the trees, types of vegetation, and the area of coverage, it is possible to monitor the primary process of reducing carbon levels in the atmosphere at localized forested areas.

Soil organic carbon stock refers to the amount of carbon accumulated in the soil, which is the primary carbon reservoir in forest ecosystems. This indicator is important for assessing the stability of the soil system and its ability to maintain the overall balance of the ecosystem. The value is determined through soil analyses, taking into account soil type, moisture, temperature, and the types of organic substances present in the soil.

Another important indicator for monitoring that reflects the qualitative state of the forest ecological system is Net Primary Productivity, which characterizes the amount of carbon accumulated in plants during photosynthesis over a given period. This parameter allows for the determination of the biological productivity of a forest through vegetation productivity indices and the forest's potential as a carbon reservoir through biomass growth indicators.

Emissions from forest degradation account for carbon losses due to forest fires, deforestation, land-use changes, or ecosystem degradation. To determine this indicator, researchers can assess the impact of anthropogenic and natural factors on the carbon balance of the system based on data about fires, land-use changes, and satellite imagery.

A source of carbon dioxide in forested areas is emissions related to soil respiration, which determine the amount of carbon that returns to the atmosphere as a result of microbial processes in the soil. Taking into account temperature conditions, humidity levels, and the presence of organic matter is calculated the indicator of soil biological activity and its role in the carbon cycle.

To ensure the effective functioning of the system have been developed three parts for data collection, data processing, and result visualization. At the data collection stage, satellite images are used to assess forest area, canopy density, and land use changes. Also are determined climatic indicators such as temperature, humidity, and precipitation, which influence carbon cycle processes. Additionally, soil analyses are conducted to determine the physicochemical properties of the soil, organic matter concentration, microbial activity levels, and updates are made regarding tree species, their age, biomass growth, damage, and diseases.

The collected data undergo processing using specialized mathematical models and algorithms. In the processing part, carbon emissions and absorption are accounted for, determining the balance between carbon accumulation and loss. Data processing allows for the generation of accurate indicators of the state of forest ecosystems and their impact on the climate. The results of data processing are presented in a user-friendly format using graphs, tables, and maps, which provide information on the spatial distribution of organic carbon stocks, degradation zones, and biomass accumulation.

One of the key features of the designed system is its modularity. Thanks to the separation of functions between the frontend and backend, along with a dedicated database, the system is easily scalable. Therefore, to add new functionality related to the implementation of more precise carbon balance analysis methods, it is sufficient to update only the server-side components, implemented in Python using the Django framework. Additionally, new visualizations or analytical capabilities can be integrated into the interface without significant changes to the backend structure.

Another important component of the information system is the use of geospatial data. The system takes into account the territorial characteristics of forest ecosystems, and the relational database PostgreSQL with the PostGIS extension enables the processing, storage, and analysis of this information. This allows for the identification of forest plot boundaries, analysis of changes in their characteristics, and visualization of relevant data on a map. Users can access territorial data in a convenient format, which contributes to more accurate assessments of the ecological state.

The integration of Power BI technologies into the forest monitoring system enables the creation of detailed reports and data visualizations. This tool allows for the transformation of large volumes of data into clear graphs, charts, and tables, which can be useful for analysts, decision-makers, and other stakeholders.

The PostgreSQL relational database management system is used in the developed monitoring information system, which works with environmental data and geospatial information to determine the carbon balance of forest ecosystems [7]. The database provides efficient management of environmental indicators, geographic boundaries of forest ecosystems, and calculation results. The PostgreSQL database stores data on forest ecosystems, including names, area, geographic coordinates, types of forest cover, carbon balance indicators such as volumes of carbon absorption and emissions, and geospatial data with cartographic information—such as polygons defining the boundaries of forest areas or points marking measurement locations. It also includes additional environmental parameters that help assess pollution levels, biomass quantity, and tree density.

The system includes the following main tables:

- forests – contains information about each forest area, including its name, coordinates, and type;
- carbon_data – holds carbon balance indicators such as carbon emissions and absorption data for each region;

- measurements – stores historical data on measurements, such as carbon dioxide concentration levels;
- users – contains information about user access and system administrators;
- geo_zones – includes geographic data on territories in PostGIS format.

An important functional feature of the designed monitoring system is geospatial analysis, which is performed using the PostGIS extension. Geospatial analysis in the system includes the following functions as calculating forest area to accurately determine the carbon balance; analyzing overlaps between forest areas and zones of anthropogenic impact; visualizing territories, highlighting regions with the highest or lowest carbon absorption; interacting with other system components, integrating spatial data into broader ecological assessments.

Conclusions

The approaches to ensuring a green future discussed in this work are based on the principles set forth by the European Commission, particularly those outlined in the Green Deal. A key priority in the formation of an environmentally sustainable and safe society is the implementation of a carbon-neutral economy at all levels of societal activity. This transition aims to prevent the spread of greenhouse gases and to address the challenges of global warming associated with changing climate conditions.

An important aspect of implementing a green economy is the use of forest areas to reduce carbon compounds and enrich the air with oxygen, making it suitable for human habitation. In today's era of rapidly advancing information technologies, it is especially crucial to leverage these technologies for environmental system monitoring. Developing forest monitoring systems can help mitigate the challenges associated with negative impacts on forests, thereby enhancing global ecological safety. The environmental monitoring system for forest areas explored in this study is distinguished by its highly efficient databases, capabilities for geospatial analysis, and modern data visualization tools based on Power BI technologies.

1. Boholyubov, V. M., Klymenko, M. O., Mokin, V. B., & others. (2010). *Environmental monitoring* (V. M. Boholyubov, Ed.). VNTU.
2. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Retrieved March 27, 2025, from <https://www.ipcc.ch/>
3. Lagun, A., & Kukharska, N. (2023). Using the information technologies for quality monitoring of different environmental impacts on humanity life. In *Contemporary technologies and society: Innovations, artificial intelligence, and challenges* (pp. 585-592). The University of Technology in Katowice Press.
4. *Forest Monitoring Designed for Action*. Retrieved April 1, 2025, from <https://www.globalforestwatch.org/>
5. *Terra-I. An eye on habitat change*. Retrieved April 5, 2025, from <http://www.terra-i.org/terra-i.html>
6. *National Forest Monitoring Systems*. Retrieved April 7, 2025, from <https://www.forestcarbonpartnership.org/national-forest-monitoring-systems>
7. *PostgreSQL 17.2 Documentation*. Retrieved April 8, 2025, from <https://www.postgresql.org/docs/current/>

ВІДКРИТІ ІОТ-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ОГЛЯД І ВИКЛИКИ

Лагун Ярослав

Національний університет «Львівська політехніка»

м.Львів, Україна

yaroslav.a.lahun@lpnu.ua

Стахів Роман

Національний університет «Львівська політехніка»

м.Львів, Україна

roman.i.stakhiv@lpnu.ua

Abstract. This paper analyzes open IoT platforms and tools for environmental data both globally and in the Ukrainian context, including examples of open-source platforms, projects, and tools. Architectural approaches, supported protocols, analytical capabilities, device compatibility, and scalability of solutions are discussed. The main scientific and practical problems of effective data processing in an IoT system for environmental monitoring are outlined separately, specifically addressing issues of integrating heterogeneous data, reducing noise in sensor measurements, real-time data processing, standardizing data models, effective visualization for decision support, and IoT system security.

Keywords: environmental monitoring, Internet of Things, IoT platforms, data processing.

Анотація. У роботі проаналізовано відкриті IoT-платформи та інструменти для екологічних даних як в глобальному масштабі, так і в українському контексті – включно з прикладами платформ, проєктів та інструментів з відкритим кодом. Розглянуто архітектурні підходи, підтримувані протоколи, аналітичні можливості, сумісність із пристроями та розширюваність рішень. Окремо окреслено основні науково-прикладні проблеми ефективної обробки даних у IoT-системі для екологічного моніторингу – зокрема, питання інтеграції різномірних даних, зниження шумів сенсорних вимірів, обробки даних у реальному часі, уніфікації моделей даних, ефективної візуалізації для підтримки рішень та безпеки IoT-систем.

Ключові слова: екологічний моніторинг, Інтернет речей, платформи IoT, обробка даних.

Інтернет речей (IoT) дедалі частіше використовується для екологічного моніторингу – від відстеження якості повітря і води до контролю шумового забруднення, температури, вологості, рівня CO₂ тощо. Відкриті програмні засоби (open-source) в екосистемах IoT відіграють ключову роль у збиранні, обробці, зберіганні, аналізі та візуалізації таких даних. Вони забезпечують гнучкість, масштабованість та можливість адаптації під різні потреби, а також сприяють спільноті розробників усього світу.

Відкриті IoT-платформи та інструменти для екологічного моніторингу [1-8]. Більшість сучасних IoT-платформ мають гнучку архітектуру, яку можна розгорнути як у хмарному середовищі, так і на локальних серверах або пристроях “на краю” мережі (edge). Типова архітектура включає давачі та контролери “на краю” (наприклад, мікроконтролери або одноплатні комп’ютери), які збирають дані та передають їх через шлюзи або безпосередньо до серверної платформи в хмарі. Багато рішень підтримують гібридну архітектуру – поєднуючи обробку на edge-пристроях для швидкого реагування з потужнішими ресурсами хмари для довготермінового зберігання та глибокого аналізу. Наприклад, платформи ThingsBoard та Mainflux можуть розгортатися на власних серверах (on-premises) або в хмарних інфраструктурах, а також підтримують контейнеризацію і оркестрацію (Docker, Kubernetes) для гнучкого масштабування. Такий підхід дозволяє

будувати стійкі до відмов системи з горизонтальним масштабуванням до сотень тисяч пристроїв.

Open-source IoT-платформи зазвичай орієнтовані на міждоперабельність і підтримують широкий спектр протоколів для підключення пристроїв. Найпоширеніші протоколи – MQTT, CoAP, HTTP/REST API, WebSockets для потокової передачі, а також спеціалізовані IoT-протоколи та стандарти [1]:

- **MQTT** – присутній практично в усіх платформах як стандарт де-факто для телеметрії;
- **CoAP, HTTP/HTTPS, WebSockets** – для прямої передачі даних або команд;
- **LwM2M (OMA Lightweight M2M)** – протокол управління пристроями, підтримується в деяких платформах (наприклад, ThingsBoard) для роботи з дуже обмеженими сенсорами;
- **LoRaWAN, SigFox, NB-IoT** – мережеві протоколи далекого радіозв'язку низької потужності, часто інтегруються через шлюзи. Наприклад, ThingsBoard заявляє підтримку NB-IoT, LoRaWAN, SigFox нарівні з MQTT, CoAP та HTTP.
- **Zigbee, BLE, OPC UA, Modbus** тощо – через додаткові шлюзи. Існують відкриті шлюзові рішення, які перетворюють ці локальні протоколи у MQTT/HTTP для надсилання на сервер. Для прикладу, ThingsBoard Gateway дозволяє під'єднати пристрій по Modbus, BACnet, BLE, OPC-UA та ін. і транспортувати дані в хмару.

Відкрита платформа DeviceHive демонструє мультипротокольність: пристрої можуть підключатися через REST API, WebSocket або MQTT, а для різних мов програмування доступні готові бібліотеки (включно з Android та iOS), що робить рішення агностичним до типу пристрою. Інша платформа, Mainflux, побудована за принципом “protocol agnostic” і має вбудований брокер NATS для маршрутизації повідомлень; вона підтримує одночасно MQTT, HTTP, WebSocket і CoAP, виступаючи універсальним PUB/SUB-мостом між різними протоколами. Така гнучкість протоколів спрощує інтеграцію різноманітних сенсорів у єдину систему.

Основні відкриті IoT-платформи (світовий досвід). В екосистемі IoT існує кілька усталених відкритих платформ, які широко застосовуються і для екологічного моніторингу:

- **ThingsBoard** [2] – повнофункціональна open-source IoT-платформа (Apache 2.0), орієнтована на збір даних, їх обробку та візуалізацію в режимі реального часу. Підтримує хмарне або локальне розгортання, масштабування мікросервісів (Kubernetes), багатопротокольний вхід (HTTP, MQTT, CoAP, LwM2M тощо) і підключення через шлюзи для legacy-протоколів. ThingsBoard забезпечує надійний збір телеметрії, гнучку систему правил для генерування подій/тривог та настроювані інформаційні панелі з понад 30 віджетами для візуалізації історичних і поточних даних. Для екопроектів платформа пропонує готові приклади: моніторинг якості повітря (AQI), погоди, рівня води, шуму тощо – з можливістю налаштування порогів тривоги і геоприв'язки сенсорів на карті. ThingsBoard використовується в багатьох країнах; зокрема, повідомляється про розгортання для моніторингу погоди навіть в Антарктиді та контролю якості повітря у великих містах.

- **DeviceHive** [3] – відкрита платформа для IoT/машинного спілкування, розроблена компанією DataArt. Має контейнерну мікросервісну архітектуру (Docker, Kubernetes) з можливістю гнучкого масштабування від одного вузла до кластеру. Підтримує REST, MQTT, WebSockets для підключення пристроїв і надає широкий вибір клієнтських SDK, що спрощує інтеграцію різних датчиків та контролерів. Особливістю DeviceHive є інтеграція з Big Data-стеком: платформа підтримує зв'язок з Elasticsearch, Apache Cassandra, Kafka, Apache Spark та Spark Streaming. Це дозволяє будувати складну аналітику – від потокової обробки стрімів даних до пакетного аналізу історичної інформації та навіть виконання алгоритмів машинного навчання на зібраних даних. Така архітектура корисна для екологічного моніторингу великого масштабу, де потрібна обробка масивів даних (наприклад, прогнозування забруднення повітря на основі історичних трендів). Платформа також забезпечує Plug-in механізми для інтеграції з зовнішніми системами і сервісами

(наприклад, можна під'єднати власну панель візуалізації або голосового помічника), а бізнес-логіку можна розширювати JavaScript-кодом.

– **Kaa IoT Platform** [4] – відкритий середовищний IoT-платформ (Apache 2.0), що позиціонується як middleware для підключених пристроїв. Kaa має модульну мікросервісну архітектуру та надає все необхідне для побудови end-to-end IoT-рішення: реєстр пристроїв, збір телеметрії, управління (конфігурація, OTA-оновлення), зберігання даних, аналітика та візуалізація. Платформа підтримує MQTT і HTTP “зі старту” для зв’язку з пристроями та дозволяє додавати інші методи підключення через механізм Kaa Gateway або навіть реалізувавши власний протокол як окремий сервіс. Kaa орієнтована на гнучкість: розробники можуть кастомізувати інтерфейси користувача та додавати нові сервіси до ядра платформи при потребі. У прикладних сценаріях екологічного моніторингу на базі Kaa відзначені такі можливості платформи, як реальний час візуалізації різноманітних сенсорних показників, динамічні інформаційні панелі для аналізу, гнучка система оповіщень (SMS, email, месенджери) при перевищенні порогів, багатокористувацька ізоляція даних (корисно для розділення даних різних громад чи клієнтів) та легке масштабування до десятків тисяч пристроїв. Kaa дозволяє реалізувати повний цикл: від збору даних метеостанцій або давачів якості води – до презентації на мобільному додатку або веб-панелі з індивідуальними контрольними панелями та сповіщеннями для користувачів.

– **Mainflux** [5] – сучасна відкрита IoT-платформа, написана мовою Go. Характеризується відкритою модульною архітектурою, високою продуктивністю та орієнтованістю на безпеку. Mainflux працює за моделлю мікросервісів (контейнеризованих та оркестрованих Kubernetes) і надає всі базові функції IoT-інфраструктури: управління пристроями та користувачами, збір і зберігання даних, маршрутизація повідомлень, обробка подій, базова аналітика та API для інтеграції. Важливою особливістю є багатопротокольність: платформа не прив’язана до конкретного типу пристроїв або протоколів і виступає універсальним брокером. Через Mainflux можна одночасно обслуговувати пристрої, що надсилають дані по MQTT, HTTP/REST, WebSocket чи CoAP – усі повідомлення приводяться до єдиного формату й маршрутизуються завдяки внутрішньому брокеру на основі NATS. Таким чином, Mainflux є агностичною до протоколів і апаратури платформою з підтримкою PUB/SUB-моделі обміну повідомленнями. Платформа побудована з акцентом на розширюваність – нові можливості можна додавати, не модифікуючи ядро, шляхом написання додаткових сервісів чи використання webhook інтеграцій. Для екологічного моніторингу Mainflux надає переваги у безпеці (вбудована авторизація JWT, TLS, управління ключами) та масштабованості. Ці рішення можна розгорнути як у хмарі, так і локально або у гібридній схемі, а при потребі навіть на рівні окремого пристрою – наприклад, на мікрокомп’ютері Raspberry Pi.

– **Node-RED** [6] – це здебільшого не платформа, а відкрите середовище розробки потоків даних, однак його варто згадати через популярність у IoT. Node-RED (проект під егідою IBM, Apache 2.0) дозволяє візуально будувати логіку обробки даних з давачів за допомогою “блок-схем” (flows). Завдяки величезній кількості готових модулів (node) Node-RED легко інтегрується з різноманітними протоколами і сервісами – від MQTT-брокерів, HTTP API, баз даних до спеціалізованих API погоди чи карт. У екологічних проєктах Node-RED часто використовують на рівні шлюзу або сервера для збору даних з сенсорів, первинної фільтрації та агрегування, а також пересилання даних до хмарного сховища. Наприклад, існують готові модулі для роботи з метеостанціями та сенсорами погоди (через UMB-протокол). Node-RED може працювати на міні-комп’ютерах (Raspberry Pi, Orange Pi тощо) і в режимі реального часу виконувати локальну обробку – це корисно для edge-аналітики, коли потрібно відфільтрувати “шум” чи зреагувати на подію без затримок мережі.

– **ThingSpeak** [7] – відкрита IoT-платформа для зберігання і аналізу часових рядів. Не зважаючи на те, що на даний час ThingSpeak асоціюється з хмарним сервісом від MathWorks, її ядро є open-source на GitHub. ThingSpeak спеціалізується на зберіганні телеметрії та надання простого REST API для запису/читання даних з сенсорів. У ній є

вбудовані засоби візуалізації графіків та інтеграція з MATLAB для проведення аналізу та розрахунків прямо в хмарі (наприклад, обчислення індексу якості повітря або виконання регресійних моделей). Деякі академічні екопроекти використовують ThingSpeak як простий бекенд: сенсори (наприклад, на базі Arduino або ESP8266) публікують показники (PM2.5, температуру, pH води тощо) на канал ThingSpeak, а потім дослідники завантажують дані або будують графіки.

– **OGC SensorThings API** [8] – це не конкретна програма, а відкритий стандарт від Open Geospatial Consortium, який заслуговує уваги при обговоренні уніфікації даних. SensorThings API визначає єдину модель даних і RESTful API для публікації сенсорних спостережень, з вбудованою геоприв'язкою і метаданими давачів. Існують відкриті реалізації цього стандарту, наприклад, FROST Server (Fraunhofer IOSB). Використання таких стандартів дозволяє різним системам “говорити однією мовою” – наприклад, міські екоплатформи можуть ділитися даними про якість довкілля через єдиний API. В Україні такий підхід ще розвивається, але в світі є приклади адаптації SensorThings API для екологічних мереж.

Українські платформи та проекти. В Україні також формується своя екосистема відкритих рішень для екологічного моніторингу, часто на громадських засадах або за участі IT-спільноти:

– **SaveDnipro / EcoCity** [9] – громадська ініціатива та НГО, яка розгорнула широку мережу недорогих станцій моніторингу якості повітря. Проект EcoCity пропонує збирати власний давач (DIY-станцію) або придбати готовий комплект, що базується на відкритому апаратному дизайні (часто використовуються давачи пилу PMS5003, плати типу Arduino/ESP тощо). Дані з цих станцій надходять до відкритої онлайн-карти EcoCity у реальному часі, де відображається Індекс якості повітря (UAQI) та концентрації PM2.5, PM10 тощо для міст України. Станом на 2023 рік ця мережа налічувала сотні сенсорів: за даними агрегатора SaveEcoBot [10], мережа SaveDnipro (EcoCity) мала 445 станцій, з яких регулярно онлайн генерують дані понад 130. Дані з станцій SaveDnipro/EcoCity відкриті – їх може переглядати будь-хто через карту або API, а також вони інтегровані до загальнонаціонального екопорталу SaveEcoBot. Таким чином, EcoCity є прикладом успішної громадської відкритої платформи: і апаратна частина і програмна розробляються спільнотою ентузіастів та інженерів. Ці станції також співпрацюють з глобальною ініціативою Luftdaten/Sensor.Community, що дозволяє передавати українські виміри до світової мапи відкритих даних.

– **Sensor.Community (Luftdaten)** [11] – хоча це глобальна платформа, її варто згадати і для України, оскільки багато українських DIY-станцій підключені саме до неї. Sensor.Community – це світова спільнота громадських давачів, яка створює відкриті екологічні дані (здебільшого про якість повітря). Проект надає інструкції з побудови простого недорогого давача (наприклад, комбінація мікроконтролера NodeMCU та лазерного давача пилу SDS011) і відкритий сервер для надсилання даних. Метою є зробити дані про довкілля доступними кожному. В Україні через Sensor.Community працюють окремі ентузіасти та організації: зокрема, частина станцій SaveDnipro дублює дані на цю платформу, а низка приватних осіб додають свої сенсори на глобальну карту. Це дозволяє порівнювати українські дані з іншими країнами та сприяє уніфікації форматів (Sensor.Community використовує спільний формат API).

– **AirGradient** [12]. Українські IT-спеціалісти беруть участь у розробці відкритих апаратних рішень для моніторингу. Приклад – проект AirC від інженерів GlobalLogic спільно зі студентами КПІ, НАУ та ін. AirC – це відкритий (open source) пристрій для вимірювання якості повітря в реальному часі, призначений для встановлення вздовж доріг. Його мета – моніторинг забруднення повітря у заторах в міських умовах. Проект відкритий, а саме опубліковано вихідний код та схеми, щоб інші могли відтворити та покращити пристрій. AirC передає дані через MQTT (а також V2X, оскільки пристрої можуть спілкуватися між собою) на хмарну інфраструктуру (в їхньому випадку використано Google Cloud Platform для

зберігання, пост-обробки та відображення на карті). Це демонструє, як гібридна архітектура (потужний сенсор з edge-обчисленнями та хмара) дозволяє швидко збирати й обробляти дані з прототипу AirC.

– **Державні ініціативи з відкритими даними.** В Україні стартують проекти єдиних екологічних платформ, наприклад, “ЕкоСистема” від Міндовкілля – національний портал, що акумулює різні дані довкілля (включно з державними даними моніторингу, відкритими громадськими сенсорами, геоданими тощо). Хоча програмне забезпечення таких порталів не завжди відкрите, самі дані публікуються як відкриті дані через API. Так, SaveEcoBot – незалежна платформа-агрегатор – збирає дані від багатьох джерел (державні станції, EcoCity, Sensor.Community, міжнародні API (як IQAir) і надає API для доступу до цих даних усім охочим. Це стимулює розробників створювати власні додатки, боти, віджети для відображення екологічної інформації (наприклад, віджет якості повітря від SaveEcoBot можна встановити на будь-який сайт).

Загалом, завдяки відкритим платформам та спільнотам, в Україні формується потужна основа для Citizen Science в екологічному моніторингу, де громадяни, науковці й IT-ентузіасты разом розгортають давачі та обмінюються даними. Це створює передумови для вирішення нових наукових та інженерних завдань у цій галузі.

Науково-прикладні проблеми ефективної обробки IoT-даних у екологічному моніторингу. Незважаючи на прогрес технологій, реалізація екосистем IoT для екологічного моніторингу наштовхується на низку викликів. Виділимо основні проблемні напрямки, які є предметом досліджень і прикладних рішень:

1. Інтеграція та інтероперабельність даних. Різні сенсорні мережі та платформи можуть використовувати різні протоколи, формати даних та моделі представлення інформації. Для створення цілісної картини довкілля потрібно об’єднувати гетерогенні дані – наприклад, дані міських станцій моніторингу повітря, громадських давачів, супутникові спостереження, метеодані тощо. Це ускладнюється відсутністю єдиних стандартів: часто кожен виробник чи проєкт має власний формат API чи схему повідомлень. Інтероперабельність стає викликом – різномірні IoT-пристрої і системи “не розуміють” один одного без посередників. Вирішення проблеми, а саме встановлення відкритих стандартів та протоколів для екоданих, запропоновані в роботах [13-15]. Експерти відзначають, що для безшовної інтеграції даних необхідно запроваджувати єдині стандарти на рівні форматів і протоколів. Прикладом таких стандартів є згаданий OGC SensorThings API, який пропонує уніфіковану модель “Спостереження–Об’єкт–Давач” з простим REST/JSON інтерфейсом.

Інший підхід – семантична інтероперабельність через онтології та стандарти типу W3C WoT (Web of Things), які описують сенс інформації у вигляді придатному для машинного читання [16].

На практиці, проміжним рішенням є розробка шлюзів та брокерів даних, які можуть приймати інформацію в різних форматах, трансформувати її та передавати до центрального сховища уніфіковано. Наприклад, платформі може надходити потік даних від однієї мережі у форматі CSV через HTTP, від іншої – через MQTT з JSON, а від третьої – через OPC UA. Шлюзова програма або мікросервіс (який можна розробити на Node-RED чи з використанням cloud functions) переносить це все до спільної структури (наприклад, поля: час, геолокація, тип показника, значення, одиниці). Також дедалі частіше застосовується інтеграція через API (наприклад OpenAQ агрегують дані з різних джерел по API і надають єдиний відкрите API для дослідників).

2. Забезпечення якості даних і зменшення “шуму”. Давачі, особливо дешеві та розгорнуті в польових умовах, генерують зашумлені, неповні або неточні дані. У результаті сирі дані можуть бути ненадійними для безпосереднього використання в аналізі чи прийнятті рішень. Постає питання фільтрації шумів, калібрування та валідації даних. В науковому контексті це дуже актуально, оскільки дослідники ставлять під сумнів якість даних з громадських мереж, якщо ті не пройшли належного очищення. Вирішенням проблем забезпечення якості даних є комплексне завдання, що включає кілька підходів [17, 18]:

– **Калібрування та верифікація сенсорів.** Необхідно періодично звіряти показники дешевих давачів з еталонними (референсними станціями) і вводити поправочні коефіцієнти. IoT-системи мають підтримувати віддалене калібрування. Наприклад, зазначається, що забезпечення якості даних та калібрування давачів залишається критичним питанням для довготривалих екологічних IoT-вимірювань і без постійної уваги до цього сенсори можуть давати зміщені результати.

– **Фільтрація шуму.** Застосовуються алгоритми цифрової обробки сигналів: ковзне середнє, медіанний фільтр, експоненціальне згладжування, або більш складні – фільтр Калмана, wavelet-фільтрація тощо. Для IoT-давачів рекомендується впроваджувати прості фільтри на стороні мікроконтролера або шлюзу, щоб зменшити випадковий шум і виділити тренд. Навіть базові методи (усереднення кількох вимірів, відсікання явних викидів) значно підвищують якість даних.

– **Виявлення та заповнення пропусків.** Якщо сенсор пропустив передачу декількох значень (збій зв'язку), на етапі аналізу варто застосувати інтерполяцію або враховувати ці прогалини, щоб моделі не спотворювалися.

– **Аналіз достовірності (validation).** Автоматичне співставлення даних з різних джерел і маркування тих, які з них вважаються менш надійними, або сигналізувати, якщо один давач показує аномалії відносно сусідніх. Наприклад у екосистемі SaveEcoBot, дані громадських давачів публікуються, але з позначкою “неверифіковані” та з застереженням, що остаточне підтвердження – з офіційних джерел.

Науковий інтерес становлять алгоритми Data Fusion – коли об'єднуються покази від декількох однотипних або різнотипних сенсорів для отримання точнішого оцінювання показника. Наприклад, комбінування значень PM2.5 з декількох розташованих поруч давачів з врахуванням їх індивідуальних похибок може дати більш точне локальне значення.

3. Обробка даних у реальному часі і затримки. Для багатьох екологічних застосувань важливою є оперативність даних – виявлення події (сплеску забруднення, аварійного викиду, перевищення радіаційного фону) повинно відбуватися з мінімальною затримкою, щоб можна було швидко реагувати. Класична архітектура “сенсор – хмара – користувач” може мати затримки у кілька секунд чи хвилин (залежно від частоти відправки, завантаженості мережі, швидкості обробки в хмарі). Цього може бути недостатньо для сценаріїв, де рішення мають прийматися негайно (наприклад, автоматичне увімкнення фільтрації або оповіщення населення). Виклик полягає у побудові системи стримінгової обробки даних з низькою затримкою та можливістю масштабуватися під потік даних від тисяч сенсорів.

Одним з основних напрямків вирішення цих проблем є Edge computing (обчислення на краю). Один з підходів – перенести частину логіки обробки ближче до джерела даних. Edge-пристрій (наприклад, шлюз або сам сенсор, якщо він достатньо потужний) може виконувати первинний аналіз і виявлення подій локально і тільки потім надсилати сигнал або агреговані дані до хмари. Це значно знижує і затримки, і навантаження на мережу. Як зазначається, локальна обробка дозволяє миттєво виявляти аномалії або зміни параметрів, а також зменшує латентність реагування. В екологічному моніторингу edge-компоненти можуть також виконувати локальні прогнози – наприклад, модель на основі нейромережі, розгорнута на одноплатному комп'ютері, яка прогнозує рівень забруднення на годину вперед для конкретного району і сигналізує про можливе перевищення [19, 20].

Іншим підходом є використання у хмарі платформ, що підтримують stream processing (наприклад, Apache Kafka + Spark Streaming, Apache Flink тощо). Це дозволяє обробляти дані на льоту, з мінімальними затримками, застосовуючи віконні агрегати, фільтри, тригери подій [21].

В системах реального часу критичною є можливість обробляти пікові навантаження, а саме повинна мати буфери і пріоритети, щоб важлива інформація (наприклад, аварійний сигнал) не загубилася серед масиву менш важливих телеметрій. Тому застосовується черга

повідомлень з пріоритетами, а протоколи QoS (Quality of Service) у MQTT дозволяють гарантувати доставку важливих повідомлень.

Отже, методи реального часу є окремим напрямком досліджень, які включають оптимальні алгоритми розподілу обчислень між edge і cloud (туманні обчислення), забезпечення узгодженості даних при розподіленій обробці, trade-off між затримкою та точністю (якщо фільтрувати більше – затримка зростає, але дані чистіші) тощо.

4. Уніфікація моделі даних і семантика. Дані довкілля можуть бути дуже різноманітними – різні фізичні величини (газові концентрації, температури, рівні звуку, індекси), різні одиниці вимірювання, різні системи координат для просторової прив'язки, різні інтервали часу. Без єдиної моделі даних важко будувати універсальні застосунки. Відсутність стандартних словників і форматів призводить до ручної роботи при кожній інтеграції. Вирішення проблеми уніфікації моделі даних забезпечують наступні елементи:

- **Стандартизація схеми.** Використання галузевих стандартів (OGC SensorThings, ISO 19156 Observations & Measurements, або фіксованих форматів JSON на кшталт тих, що просуває FIWARE з моделями Smart Data Models) допомагає заздалегідь визначити, як представляти дані [22].

- **Метадані і семантика.** Важливо супроводжувати дані метаданими: яка точність давача, де він встановлений (висота над землею, умови експлуатації), який метод вимірювання. Це необхідно і для довіри до даних, і для їх коректного використання (наприклад, дані температури на сонці і в тіні відрізняються – і це варто позначати). В дослідженнях пропонується створювати онтології IoT-спостережень – спільні словники, які описують типи давачів і їх властивості, щоб машини могли автоматично інтерпретувати потоки даних.

- **Узгодження різних масштабів.** Дані можуть приходити з різною періодичністю (одноосібні сенсори щосекунди, супутникові – щодня). Тому модель повинна враховувати часову роздільність, а аналітика – вміти агрегувати чи детальніше розбивати, щоб порівнювати різні джерела.

- **Відкриті інтерфейси.** Наявність відкритого API з добре задокументованою моделлю даних (наприклад, “/sensors – список давачів, /observations – спостереження з полями X, Y, Z”) дозволяє будь-якому новому учаснику екосистеми швидко зрозуміти і під’єднатися, не винаходячи власну структуру.

Уніфікація моделей даних – це здебільшого питання організаційно-технічних стандартів, і її просування часто потребує співпраці урядів, громадськості та розробників. В українському контексті, кроком до цього є публікація єдиних відкритих наборів даних про довкілля. Якщо всі будуть використовувати ці набори (наприклад, офіційний довідник місць вимірювання, чи єдину методику розрахунку індексу якості повітря), то згодом і формати вихідних даних стануть більш уніфікованими.

5. Візуалізація даних та підтримка рішень. Навіть якісні та оперативні дані мало вартують, якщо вони не представлені у зрозумілій для людей формі. Кінцеві користувачі екологічних систем – це можуть бути як фахівці (екологи, аналітики), так і широке населення, влада, бізнес. Кожна аудиторія потребує своєї подачі інформації: від детальних наукових графіків до простих індикаторів “добре/погано” для масового використання. Основними викликами візуалізації даних в IoT системах екологічного моніторингу є:

- створення інформативних і при цьому простих інформаційних панелей,
- відображення геоприв’язаних даних (карти, теплокарти забруднень),
- відображення історичних трендів і прогнозів (наприклад, графік зміни рівня шуму протягом доби),

- інтерактивність (можливість користувачу обрати період, параметр, накласти шари даних),

- пов’язання даних з рішеннями. Це означає, що система повинна не лише показати “рівень $\text{NO}_2 = 80 \text{ мкг/м}^3$ ”, а й надати контекст – чи це перевищення норми, надати рекомендації (наприклад, “захистіть дихальні шляхи, не виходьте на вулицю”), можливо,

спрогнозувати розвиток (“очікується покращення ввечері”). Така аналітика на основі даних допомагає приймати управлінські рішення або змінювати поведінку людей.

Вирішенням проблеми візуалізації даних та підтримки рішень є ряд завдань, що включають кілька підходів:

- **Гнучкі платформи візуалізації.** Використання перевірених інструментів, як-от Grafana (open-source панель для часових рядів), веб-бібліотеки для побудови карт (Leaflet, Mapbox) та графіків (D3.js, Chart.js), інтеграція з GIS-системами (наприклад, QGIS, ArcGIS Online). Багато відкритих IoT-платформ мають вбудовані дашборди (ThingsBoard, Каа, Thinger.io тощо), що дозволяють перетягуванням створювати графіки, карти, текстові віджети. Це значно скорочує час на розробку представлення даних.

- **Налаштування під користувача.** В ідеалі, система повинна дозволяти різні режими відображення для різних ролей. Наприклад, публічна сторінка показує агреговані індекси якості повітря з кольоровим маркуванням (зелений, жовтий, червоний), а внутрішній портал для науковців дає доступ до сирих даних, статистики, можливості завантажити CSV. ThingsBoard, наприклад, підтримує створення кількох інформаційних панелей та розподіл їх окремо кінцевим користувачам.

- **Аналітичні підказки.** Вбудовування у візуалізацію модулів аналітики: наприклад, автоматично підраховувати за добу середнє і порівнювати з нормою, відображати під графіком текст “перевищення норми на 20%” чи “сьогодні найчистіше повітря за тиждень”. Це потребує визначення правил і моделей оцінки. У екологічних IoT-системах нерідко використовується практика індексів – узагальнені показники (AQI для повітря, WQI для води тощо), які зводять кілька параметрів в одне числове або категоріальне значення з інтерпретацією. Програмні засоби мають надавати можливість розрахунку таких індексів з сирих даних і візуалізації їх у зручний спосіб (кольором, значком).

- **Прогнозування і сценарії.** Окремий рівень – це прогнознi моделі та what-if аналіз. Сучасні IoT-платформи починають інтегрувати елементи штучного інтелекту: наприклад, тренувати моделі на історичних даних і відображати прогноз як додаткову криву на графіку або давати попередження (“очікується погіршення завтра”). Інтеграція ML/AI в екоплатформи – перспективна задача; вже нині досліджується поєднання IoT з технологіями штучного інтелекту для покращення збору даних і глибшого аналізу. Але це потребує значних обчислень і ретельної роботи з даними.

В цілому, якісна візуалізація – це те, що переводить “велику кількість сирих цифр” у зрозумілу історію про довкілля. Для прийняття рішень органами влади чи реагування служб важливо мати оперативні інформаційні панелі з акцентом на аномаліях і ключових показниках, а для громадян – прості інтерактивні карти та сповіщення (наприклад, push-повідомлення на смартфон при різкому погіршенні якості повітря поблизу). Розробка таких систем – мультидисциплінарна задача, що поєднує IT, UX-дизайн, екологію та комунікації.

6. Безпека та конфіденційність в IoT-системах [23]. Для IoT-систем, особливо з відкритою архітектурою, існує ряд кібербезпекових ризиків. Велика кількість підключених пристроїв – це велика кількість потенційних точок входу для злоумисників. Типові загрози: перехоплення або підміна даних, що може призвести до неправильних рішень (підробка показів радіації), несанкціонований доступ до пристроїв (модифікація прошивки сенсора, щоб він збирав іншу інформацію або перестав працювати), DDoS-атаки на серверну інфраструктуру, злам облікових записів користувачів. Також питання конфіденційності даних: екологічні дані здебільшого публічні, але, наприклад, якщо йдеться про давачі всередині приміщень чи на приватній території, власники можуть накласти заборону на публікацію всіх даних (за непрямыми ознаками можна дізнатися, чи є люди вдома, тощо). Одним з основних напрямків вирішення цих проблем є шифрування і аутентифікація. Рекомендується на рівні пристроїв використання протоколів з шифруванням (TLS для MQTT, HTTPS для REST). Багато open-source платформ мають вбудовані механізми: напр., Mainflux реалізує mTLS (mutual TLS) з X.509 сертифікатами і токенами для доступу пристроїв, ThingsBoard підтримує OAuth2 для користувачів тощо. Для забезпечення

контролю доступу та ізоляції необхідно впроваджувати різні рівні прав доступу: хто може переглядати дані, хто – редагувати настройки, хто – додавати пристрої. Деякі платформи дозволяють мультиоренду (multi-tenant), коли дані групуються і ізолюються між різними організаціями – це актуально, коли одна система обслуговує, приміром, кілька міських громад: кожна бачить лише свої сенсори, а загальна публічна картина складається з узагальнених даних. Для моніторингу та оновлення безпеки потрібно постійно оновлювати прошивки пристроїв (ОТА-оновлення), закривати знайдені вразливості. Для захисту від атак на рівні серверів – використовувати брандмауери, rate limiting (обмеження частоти запитів, щоб запобігти DDoS), резервування каналів; на рівні даних – верифікувати аномальні значення. Анонімізація або локальне збереження даних вирішує проблему конфіденційності.

Висновок: Розгортання ефективної екосистеми Інтернету речей для моніторингу довкілля потребує поєднання правильних інструментів (відкритих платформ, стандартів, алгоритмів) та врахування численних аспектів обробки даних. Open-source рішення, такі як ThingsBoard, DeviceHive, Kaa, Mainflux та ін., вже зараз надають міцний фундамент – вони забезпечують підключення тисяч давачів за різними протоколами, стійке зберігання телеметрії і багаті можливості аналізу та візуалізації. В українському контексті, опора на відкриті технології дозволила швидко створити громадські мережі моніторингу (як-от EcoCity), інтегруватися у світові проекти та відкрити доступ до екологічних даних широкому загалу.

Однак, предметом активних досліджень залишається ряд науково-практичних викликів, а саме: автоматичне очищення даних давачів, об'єднання даних з різних джерел в один формат, забезпечення реакції системи в реальному часі без “вузьких місць”, представлення складних масивів інформації у простій зрозумілій для користувачів формі, захист системи від збоїв та атак. Вирішення цих проблем потребує міждисциплінарного підходу, а саме залучення фахівців з обробки сигналів, спеціалістів з баз даних і big data, експертів з кібербезпеки, а також тісної співпраці з екологами та держорганами щодо стандартизації даних. Як результат, існує реальна можливість створення моделі типової IoT-системи екологічного моніторингу, яка буде надійною, масштабованою, відкритою і здатною надавати точні знання про стан довкілля в режимі реального часу. Це, своєю чергою, сприятиме прийняттю обґрунтованих рішень для охорони природи і здоров'я людей як на глобальному, так і на локальному рівнях.

1. IoT Protocols (n.d.). A Comprehensive Guide to IoT Protocols. URL: <https://www.emnify.com/blog/guide-iot-protocols>
2. ThingsBoard. (n.d.). ThingsBoard — Open-source IoT (Internet of Things) Platform. URL: <https://thingsboard.io/>
3. DeviceHive. (n.d.). DeviceHive - Open Source IoT Data Platform with the wide range of integration options. URL: <https://devicehive.com/>
4. Kaa IoT. (n.d.). Edge-to-cloud IoT solutions with Kaa IoT Platform. URL: <https://www.kaaiot.com/advantages/edge-to-cloud-iot-solutions>
5. Mainflux. (n.d.). Mainflux Open Source IoT Platform. URL: <https://mainflux.com/>
6. Node-RED. (n.d.). Node-RED. URL: <https://nodered.org/>
7. ThingSpeak. (n.d.). ThingSpeak — IoT analytics platform. URL: <https://thingspeak.mathworks.com/>
8. Open Geospatial Consortium (OGC). (n.d.). SensorThings API. URL: <https://www.ogc.org/standards/sensorthings/>
9. SaveDnipro. (n.d.). SaveDnipro. URL: <https://www.savednipro.org/>
10. SaveEcoBot. (n.d.). Платформи – SaveEcoBot. URL: <https://www.saveecobot.com/platforms>
11. Sensor.Community. (n.d.). Sensor.Community. URL: <https://sensor.community/ua/>
12. Dou.ua. (2023). Як ми створили AirC – пристрій для моніторингу якості повітря на дорогах в реальному часі. URL: <https://dou.ua/forums/topic/35107>

13. Sathyamoorthy, S., Matthew, U.O., Adekunle, T.S., & Okafor, N.U. (2024). Advances and Challenges in IoT Sensors Data Handling and Processing in Environmental Monitoring Networks. *HAFED POLY Journal of Science, Management and Technology*, 5(2). <https://doi.org/10.4314/hpjsmt.v5i2.3>
14. Episensor. (n.d.). The Future of Environmental Monitoring: IoT and Big Data Analytics. URL: <https://episensor.com/knowledge-base/the-future-of-environmental-monitoring-iot-and-big-data-analytics/>
15. Horsburgh, J. S., Lippold, K., & Slaugh, D. L. (2025). Adapting OGC's SensorThings API and data model to support data management and sharing for environmental sensors. *Environmental Modelling & Software*, 183, 106241. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106241>
16. Ibaseta, D., García, A., Álvarez, M., Garzón, B., Díez, F., Coca, P., Del Pero, C., & Molleda, J. (2021). Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102637. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102637>
17. Ma'arif, A., Iswanto, I., Nuryono, A., & Alfian, R. (2019). Kalman filter for noise reducer on sensor readings. *Signal and Image Processing Letters*, 1(2), 50-61. <https://doi.org/10.31763/simple.v1i2.2>
18. Alam, F., Mehmood, R., Katib, I., Albogami, N. N., & Albeshri, A. (2017). Data Fusion and IoT for Smart Ubiquitous Environments: A Survey. *IEEE Access*, 5, 9533–9554. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2697839>
19. Andriulo, F. C., Fiore, M., Mongiello, M., Traversa, E., & Zizzo, V. (2024). Edge computing and cloud computing for Internet of Things: A review. *Informatics*, 11(4), 71. <https://doi.org/10.3390/informatics11040071>
20. Roostaei, J., Wager, Y. Z., Shi, W., Dittrich, T., Miller, C., Gopalakrishnan, K. (2023). IoT-based edge computing (IoTEC) for improved environmental monitoring. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100870. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100870>
21. Akanbi, A., & Masinde, M. (2020). A distributed stream processing middleware framework for real-time analysis of heterogeneous data on big data platform: Case of environmental monitoring. *Sensors*, 20(11), 3166. <https://doi.org/10.3390/s20113166>
22. Kouloglou, I.-O., Antzoulatos, G., Vosinakis, G., Lombardo, F., Abella, A., Bakratsas, M., Moutzidou, A., Maltezos, E., Gialampoukidis, I., Ouzounoglou, E., Vrochidis, S., Amditis, A., Kompatsiaris, I., & Ferri, M. (2024). FIWARE-compatible smart data models for satellite imagery and flood risk assessment to enhance data management. *Information*, 15(5), 257. <https://doi.org/10.3390/info15050257>
23. Mohammad, N., Khatoon, R., Nilima, S., Akter, J., Kamruzzaman, M., & Sozib, H. (2024). Ensuring security and privacy in the Internet of Things: Challenges and solutions. *Journal of Computer and Communications*, 12, 257-277. <https://doi.org/10.4236/jcc.2024.128016>

ТРАНСНАЦІОНАЛЬНА ПОЛІТИКА ЄС В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: РИЗИКОЛОГІЧНИЙ НАПРЯМ ДОСЛІДЖЕНЬ EU TRANSNATIONAL POLICY IN THE CONTEXT OF GLOBAL DIGITAL TRANSFORMATIONS: RISKY RESEARCH DIRECTION

*Майстрок Наталія
Інститут соціології НАН України
м. Київ, Україна
mnatalia@i-soc.org.ua*

У розділі розглядаються проблеми, пов'язані із глобальними викликами сучасності, підґрунтям яких є зміна клімату, втрата біорізноманіття, шкода довкіллю, війни, сучасні цифрові трансформації тощо. Проблеми ризикогенності глобального соціуму, можливостей її зменшення знаходяться у центрі уваги як наукових рефлексій, так і транснаціональної політики ЄС. Глобальне лідерство є однією з провідних цілей Європейського Союзу як впливового міжнародного об'єднання, яке сьогодні протистоїть глобальним викликам. Україна, підтримуючи основні ініціативи ЄС, незважаючи на війну, продовжує активно впроваджувати курс на євроінтеграцію, зелену економіку, здійснює задля цього необхідне реформування з метою як підвищення рівня добробуту населення, забезпечення соціальної справедливості, так і зниження екологічних та інших ризиків.

Ключові слова: транснаціональна політика, глобальні цифрові трансформації, ризикологічний напрям, глобальне лідерство, екологізація економіки, екологічний моніторинг

The chapter studied the problems associated with the global challenges of our time, the basic of which is climate change, biodiversity loss, environmental damage, wars, modern digital transformation and etc. The problems of riskogenicity of global society, the possibilities of its reduction are in the focus of both scientific reflections and transnational policy of the EU. Global leadership is one of the EUs leading goals as an influential international association that today confronts global challenges. Ukraine, supporting the main initiatives of the EU, despite the war, continues to actively implement the course towards European integration, the green economy, carries out the necessary reform for this purpose in order to both increase the level of welfare of the population, ensure social justice, and reduce environmental and other risks.

Keywords: transnational politics, global digital transformation, risky direction, global leadership, greening the economy, environmental monitoring

Сучасний глобальний світ характеризується як мінливий, невизначений, турбулентний тощо. Провідними тенденціями сучасності стали формування (після катастроф обох світових війн) соціальних держав та глобалізація і транснаціоналізація, яка створила нові соціальні зв'язки, відносини економічної, а потім і глобальної взаємозалежності в цілому, що перетинали національні кордони та призвели до формування наднаціональних об'єднань, зокрема Європейського Союзу, що обумовило необхідність вироблення засад спільної життєдіяльності, зокрема транснаціональної політики, що не виключає національний політичний вектор, а, навпаки, передбачає можливість дій, як у транснаціональному, так і національному просторі та їх узгодженість. Європейськість тісно пов'язана з коренями західної цивілізації: грецька філософія, римське право, християнські моральні принципи, Відродження, Реформа, Просвітництво тощо. Наприклад, Ю. Габермас зазначає, що європейські держави всезагального добробуту достатньо довго грали роль взірців та моделей. Християнство та капіталізм, природознавство та техніка, римське право та Кодекс Наполеона, громадсько-міська форма життя, демократія та права людини, секуляризація держави та суспільства розповсюдилися із Європи на інші континенти (Habermas, 2004). У червні 2022 року Україні було надано статус кандидата у члени ЄС.

Зміна клімату, втрата біорізноманіття, шкода довкіллю, війни знов і знов висуюють на порядок денний питання виживання як Європи, так і глобального світу в цілому. Разом з цим, Європа послідовно відстоює позиції відповідального глобального лідера як у сенсі вироблення нового наукового знання, активного впровадження інновацій, зокрема цифрових технологій, ШІ тощо, так і упередження ризиків. Зокрема, задля прискореного відновлення ЄС після пандемії COVID-19 довгостроковим бюджетом ЄС на 2021-2027 рр., а також спеціальним планом відновлення Next Generation EU передбачено виділення 2018 млрд. євро, з метою зробити Європу здоровішою, більш сильною в екологічному та цифровому аспектах. Проблематика криз, глобальних ризиків є однією з провідних на Всесвітньому економічному форумі (ВЕФ) у Давосі. У 2025 році, на думку експертів, збройні конфлікти є найбільшим ризиком, оскільки війна в Україні та події останніх років у світі поставили під загрозу існування людства. Кожний четвертий з 900 експертів з науковців, бізнесу і політики, назвав конфлікти, включаючи війни і тероризм, найбільш серйозним ризиком задля економічного зростання. В цілому, лейтмотивом ВЕФ у 2025 році була проблематика «співпраці в інтелектуальну епоху», оскільки події останніх трьох років в Україні та світі поставили під сумнів ефективність інститутів світового порядку, що виникли після Другої світової війни. Зберігають своє значення і такі ризики, як екстремальні погодні явища, а також дезінформація, технологічні загрози, негативні наслідки використання штучного інтелекту (*The Global Risks Report, 2025*).

Різні аспекти особливостей протікання трансформаційних процесів, у тому числі в конфліктологічному та ризикологічному ракурсі, а також у глобальному, європейському, українському вимірі проаналізовано у працях Є. Головахи, Н. Паніної, В. Судакова, С. Макеєва, В. Степаненка, Г. Чепурко, О. Стегнія, Л. Скокової та інших українських соціологів. Різноманітний емпіричний матеріал для аналізу тенденцій соціальних змін в Україні та Європі надавав загальноєвропейський моніторинговий проект «Європейське соціальне дослідження» (ESS), що проводилося з 2005 р. ІС НАН України за участі наукових колективів 30 країн Європи, і щорічний соціологічний моніторинг «Українське суспільство» (Інститут соціології НАН України), започаткований у 1991 році.

Проблематика ризиків є однією з центральних тем у наукових рефлексіях таких європейських соціологів, як Н. Луман, У. Бек, Е. Гіденс та ін. (Майструк, 2024). Так, німецький соціолог У. Бек у праці «Суспільство ризику. На шляху до іншого Модерну» характеризує глобалізацію як процес деполітизації та дерегулювання суспільств. Глобалізація розглядається ним у контексті аналізу її наслідків – екологічної кризи та інших криз, а також ризиків, підкреслюючи їх системний характер. Системні ризики трактуються як закономірний наслідок швидких і докорінних технологічних, економічних та соціальних змін сучасного світу (Скокова, 2022, с.46). Сучасні ризики відрізняються від небезпек минулих часів тим, що, вони є невід’ємним моментом сучасної модернізації та тим, що постійно породжують у людей відчуття невпевненості й страху. Вони внутрішньо притаманні процесу модернізації та відмічаються своїм «мирним походженням» у світових центрах раціональності в межах закону та порядку, є результатом колективних рішень на користь техноекономічних переваг та нових можливостей, які базуються на трактовці небезпек просто як витрат прогресу. Зворотній бік прогресу все частіше стає рушійною силою політики. Ядерна загроза, зміни клімату, фінансова криза, теракти: такі ризики не обмежені просторовими, часовими, суспільними межами, від них не можна застрахуватися. Крім того, «високодиференційованому розподілу праці відповідає загальна співучасть у злочині, а цій співучасті – всезагальна безвідповідальність» (Бек, 1986). Так, поняття «природної катастрофи», на думку Бека, належить минулим століттям і є помилковим, оскільки природі невідомі катастрофи. Цунамі або землетруси стають катастрофами тільки в контексті їх відношення до цивілізації в цілому. Будівництво атомних електростанцій у сейсμοзагрозливій зоні, наприклад у Японії, - це політичне рішення, відповідальність за яке повинні нести ті, хто його приймає. У сьогоденні людство опинилося у стані сприйняття цивілізаційної загрози людства самому собі. Якщо політична теорія суверенітету Т. Гоббса

базується на формулі «людина людині вовк», то «на противагу цьому, політична теорія суспільства ризику виходить з дещо іншого принципу: *людство людству вовк*. «Хижацький характер», про який говорить Гоббс, приписується не тільки окремій людині, а й людству. Людство є суб'єктом і об'єктом загрози самому собі. Легітимність створюється ...*вірою в можливість відвернути* небезпеку, що загрожує людству, *за допомогою* політичної дії *від імені* загроженого людства, яке й забезпечує легітимність. У цьому сенсі основні відносини спільного життя, включаючи сам національно-державний порядок, опиняються під владою примату мінливості, альтернативності й контингентності (Бек, 2015, с.316).

Ризикогенність глобального соціуму посилюється турбулентністю, яка на думку, академіка НАН України В. Бакірова, набуває ознак довготривалого процесу. Ми є свідками нескінченного потоку безпрецедентно небезпечних ситуацій, подій, трендів, що радикально змінюють і руйнують соціальні порядки на всіх рівнях. На глобальному рівні зростає політична, ідеологічна, економічна напруженість, але зменшується авторитет міжнародних організацій та інше і, як результат – реальна загроза ядерного апокаліпсису. Додамо до цього переліку активізацію міжнародного тероризму, бурхливі некеровані міграційні потоки, зростання політичного радикалізму і екстремізму, кліматичні і техногенні катастрофи, щоби отримати сумну картину загальної нестабільності, нестійкості і невизначеності (Бакіров, 2025). До цих чинників турбулентності, підвищеної ризикогенності слід додати і війну в Україні. Є. Головаха зазначає, що російсько-українська війна принесла українському народові величезні страждання, катастрофічні збитки в економіці, інфраструктурі та довкіллі. Натомість, якщо десять років тому українське суспільство перебувало в стані хаотичної трансформації з невиразним вектором розвитку та відкладеним пострадянським транзитом, то нині, внаслідок спротиву повномасштабній агресії, суспільство чітко визначилося на користь європейського цивілізаційного курсу (Головаха, 2025).

Так само як і наукові рефлексії, Європейська транснаціональна політика завжди характеризувалася своєю спрямованістю на мінімізацію ризикогенності суспільства. Для збереження цивілізації, зокрема європейської неабияке значення має її відповідальне глобальне лідерство. Слід зазначити, що глобальне лідерство є однією з провідних цілей Європейського Союзу як впливового міжнародного об'єднання, яке сьогодні переживає внутрішні суперечності та протистоїть глобальним викликам. Так, ще у 2019 р. лідери країн ЄС беззаперечно утвердили мету – створення ЄС кліматично нейтральним до 2050 р. Задля подолання екзистенційної загрози зміни клімату і, відповідно реалізації поставлених завдань ЄС прийняв дві ключові довгострокові екологічні стратегії, які спрямовані на вирішення кліматичних проблем, – European Green Deal (Європейську зелену угоду або курс) та похідну від неї – Global Gateway (Глобальний шлях). Так, основними пріоритетами Clean Industrial Deal є наступні: 1) впровадження відповідної законодавчої бази до 2030 р., зокрема Закону про прискорення промислової декарбонізації для підтримки галузей та компаній в перехідний період та імплементацію Закону про цифрові послуги; 2) зосередження на підтримці та створенні належних умов для компаній для досягнення спільних цілей (забезпечення доступу до дешевих, стійких та безпечних енергоносіїв та сировини); 3) спрямування інвестицій в інфраструктуру та промисловість, зокрема в енергетику; 4) постачання сировини, чистої енергії та чистих технологій з усього світу; 5) інвестування в заходи з енергоефективності, діджиталізації енергетичної системи та розгортання водневої мережі; 6) створення Стратегічного плану розвитку STEM-освіти; 7) лідерство ЄС у міжнародних кліматичних переговорах; 8) посилення «зеленої» дипломатії і взаємодії з країнами, що не є членами ЄС щодо зовнішніх аспектів політики ЄС тощо. Вищезазначені європейські стратегії EGD, Global Gateway та Clean Industrial Deal є практичними ознаками глобального лідерства ЄС в умовах сучасних кліматичних змін (Івасечко&Турчин, с. 310). Однією із останніх спроб ЄС зміцнити свій вплив є запровадження у 2021 році глобальної стратегії Global Gateway, яка спрямована на розвиток розумних, чистих і безпечних зв'язків у різних секторах, зокрема цифровому, транспортному та енергетичному, а також на зміцнення систем освіти, охорони здоров'я та наукових досліджень у світі. На її реалізацію заплановано

фінансування до 300 млрд. євро задля розумних інвестицій в якісну інфраструктуру із дотриманням найвищих стандартів, як екологічних, так і соціальних, та збереженням непорушності основних принципів і цінностей ЄС (Івасечко&Цебенко, 2024).

Оскільки серед основних викликів для транснаціональної політики країн ЄС можна назвати: зміни клімату, виснаження природних ресурсів і зростаючий тиск на екосистеми планети. Тому значним кроком задля подолання цих суперечностей було впровадження курсу на зелену економіку, яка передбачала збалансовану та ефективну інтеграцію соціальної, економічної та екологічної складової функціонування суспільства. Згідно з визначеннями, наданими у Програмі ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) зелена економіка передбачає створення такої економічної системи, котра має на меті з одного боку, підвищення рівня добробуту населення, забезпечення соціальної справедливості, та з іншого – істотне зниження екологічних ризиків та дефіциту природних ресурсів. ЄС активно впроваджує принципи зеленої економіки через Зелений курс, який ставить за мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Україна, як один партнерів ЄС, розглядає можливості впровадження цих стандартів для модернізації економіки, зокрема через підвищення енергоефективності, зменшення викидів парникових газів та впровадження цифрових технологій. Однак процес зеленої трансформації супроводжується певними труднощами, зокрема в адаптації до нових екологічних стандартів, в залученні фінансування та в реформуванні національної політики. В цілому Україна має неабиякі потенційні можливості задля успішного впровадження за значених принципів Європейського Зеленого курсу, але для цього треба провести комплекс екологічних реформ, що мають забезпечити гармонізацію з європейськими стандартами. Серед основних можна назвати: екологічний контроль та відповідальність; моніторинг викидів та звітність; оцінку впливу на довкілля (ОВД); стратегічну екологічну оцінку (СЕО); реформи у сфері управління водними ресурсами, зменшення промислового забруднення; моніторинг забруднення; доступ до екологічної інформації; охорони біорізноманіття. Так, відповідно до прийнятого ЗУ «Про стратегічну екологічну оцінку» (2018) – СЕО визначається як процедура визначення, опису та аналізу наслідків для довкілля та здоров'я населення від державних програм планування та розвитку (Демидюк&Красота, 2025, с. 10-14).

З метою реалізації зазначених напрямів, а також сприянню екологізації економіки, Постановою Кабінету Міністрів України від 13 червня 2024 р., № 684 затверджено «Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем». Дані та інформація, одержані в рамках функціонування системи моніторингу та її підсистем, є складовими частинами автоматизованих інформаційних систем, що створені для забезпечення їх функціонування та відображаються на Єдиній екологічній платформі «ЕкоСистема». Її складовими є моніторинг атмосферного повітря; моніторинг вод; моніторинг земель та ґрунтів; моніторинг лісів; моніторинг біологічного та ландшафтного різноманіття; моніторинг у сфері управління відходами; моніторинг геологічного середовища; моніторинг впливу фізичних факторів (температура, шум, вібрація, іонізуюче та неіонізуюче випромінювання). Цілями системи моніторингу є: оперативне та безперервне інформування органів державної влади, органів місцевого самоврядування і населення про стан довкілля в разі загрози виникнення або виникнення надзвичайної екологічної ситуації; збирання інформації про кількісні та якісні характеристики стану довкілля та природних ресурсів, відстежування та прогнозування тенденцій щодо їх змін; підвищення рівня оперативності, достовірності, об'єктивності та якості інформаційного обслуговування користувачів на всіх рівнях; обґрунтування здійснення природоохоронних заходів та відстеження ефективності їх здійснення; сприяння розвитку міжнародного співробітництва в галузі охорони навколишнього природного середовища; захист екологічних інтересів людини і суспільства; збереження і відтворення природних екосистем; ощадливе використання природних ресурсів; запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям та ін. (Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем, 2024). Ефективне функціонування системи моніторингу має сприяти зниженню

ризикогенності соціуму. Наприклад, майже катастрофічною в Україні є ситуація з сортуванням сміття, оскільки у 2021 р. вона потрапила до 10 країн (Канада займає перше місце з 36,8 т. сміття на людину), які виробляють найбільше сміття, з яких 90% складають небезпечні відходи. В Україні на кожного громадянина випадає 10,6 тонн сміття, при цьому у нас переробляється 3,2% обсягу сміття, а в Канаді - 20,6%. Окрім переробки сміття та управління відходами, актуальними напрямками зеленої економіки в Україні є також і відновлення енергетики, екологічний транспорт, органічне сільське господарство, екологічна освіта та ін. (*Топ 5 шляхів*, 2025).

Також велику ризикогенність має сфера, що пов'язана із розвитком та впровадженням (особливо неконтрольованим) штучного інтелекту (ШІ). Інвестиції в штучний інтелект швидко зростають, до 2030 року очікується його зростання майже до двох трильйонів доларів. Системи штучного інтелекту вже багато в чому присутні в повсякденному житті, допомагаючи людям, компаніям або урядам працювати ефективніше. Однак у цієї технології є і зворотний бік. Наприклад, вчені з Массачусетського університету (2019 р.) підрахували, що «навчання» одного великого пристрою штучного інтелекту може призвести до викиду до 284 тонн CO₂-еквівалента - майже вп'ятеро більше, ніж викиди автомобіля за весь термін його виробництва та експлуатації. Після завершення «етапу навчання» подальші викиди відбуваються під час роботи системи, що може відбуватися мільярди разів на день - наприклад, щоразу, коли онлайн-перекладач перекладає слово або чат-бот відповідає на запитання, на цей етап може припадати до 90 відсотків викидів за весь життєвий цикл ШІ. В цілому технологічні гіганти мають непоганий досвід використання відновлюваних джерел енергії. Наприклад, компанія Google стверджує, що завдяки інвестиціям у компенсацію викидів вуглекислого газу її діяльність не чинить негативного впливу на довкілля. До 2030 року компанія має намір працювати виключно на енергії, що не призводить до викидів CO₂. Microsoft взяла на себе зобов'язання до 2030 року не викидати CO₂ в атмосферу за рахунок використання таких технологій, як вловлювання і зберігання вуглецю. Meta Group планує до 2030 року домогтися нульового вуглецевого сліду у всьому своєму ланцюжку (Мюллер, 2025). Але названі ризики від використання ШІ є не єдиними, слід враховувати і кібервійни, кібершпигунство, а також інші кіберзагрози, тому останніми роками експертами з числа науковців, урядовців, бізнесменів, громадських діячів вони відносяться до основних глобальних викликів. Так, ризики, що пов'язані з ШІ, знаходяться у центрі уваги ухваленого 13 березня 2024 року Європарламентом (набув чинності у Євросоюзі 1 серпня 2024 року) першого у світі Закону ЄС про штучний інтелект (AI Act), який регулює розробку та використання ШІ. Згідно ньому, пріоритетом є забезпечення того, що системи штучного інтелекту будуть безпечними, прозорими, можуть бути відслідковуваними, не дискримінаційними та екологічно безпечними. Законом встановлено: гармонізовані правила щодо введення на ринок, введення в експлуатацію та використання систем штучного інтелекту; заборони деяких практик у цій сфері; вимоги до систем штучного інтелекту високого ризику; гармонізовані правила щодо прозорості для певних систем ШІ; правила моніторингу ринку тощо; заходи щодо підтримки інновацій, включаючи стартапи (*Інновації та безпека*, 2024). Провідною темою цього закону є обґрунтування необхідності регулювання ШІ на підставі його потенційних ризиків і їх впливу на суспільство. 17 травня 2024 року Радою Європи було ухвалено «Рамкову конвенцію про штучний інтелект, права людини, демократію і верховенство права», що відкрита для приєднання також для країн за межами Європи, охоплює усі аспекти застосування і ризиків, пов'язаних із застосуванням ШІ в контексті дотримання прав людини, поваги до демократичних стандартів і верховенства права (Ємець, 2024). Велика частина роботи у цьому напрямі вже зроблено в нашій країні, оскільки вже з жовтня 2019 року Україна приєдналася до Рекомендацій Організації економічного співробітництва і розвитку з питань штучного інтелекту, а у 2020 році розпорядженням Кабінету Міністрів України від 2 грудня 2020 р., № 1556-р. схвалено Концепцію розвитку штучного інтелекту в Україні, яка визначала наявність низької проблем у розвитку ШІ в Україні та основні напрями діяльності у цьому контексті (*Концепція*

розвитку штучного інтелекту в Україні, 2020). Неабияке значення мало розроблення у 2023 році Дорожньої карти з регулювання ШІ в Україні, яка мала допомогти українським компаніям підготуватися до ухвалення в Україні закону, що став би аналогом європейського AI Act, а громадянам - навчитися захищати себе від ризиків ШІ, а також Білої книги з регулювання ШІ в Україні, яка була підготовлена за підтримки Агентства США з міжнародного розвитку в рамках Проєкту USAID «Кібербезпека критично важливої інфраструктури України» та Проєкту «Підтримка цифрової трансформації» за підтримки USAID і UK Dev із залученням до її розробки експертів з громадського сектору, бізнесу, державних посадовців, науковців (Соболева, 2024). Важливим елементом стратегії є розробка механізмів підтримки й розвитку культури співрегулювання і саморегулювання у цій сфері, а саме - системи кодексів добровільної поведінки для бізнесу задля укріплення довіри між громадянами та розробниками ШІ. Так, вже розроблено рекомендації з відповідального використання штучного інтелекту у сфері освіти, медіа, дотримання прав людини та захисту персональних даних, готельного бізнесу.

Отже, незважаючи на багатомісячні зусилля науковців, представників широких кіл громадськості, глобальний світ перебуває у стані все більшої турбулентності, конфліктності, ризикогенності, що актуалізує необхідність подальших мультидисциплінарних досліджень у цьому напрямі.

1. Бакіров, В. (2025). *Жити в турбулентному світі*. https://isnasu.org.ua/popsci/028_Bakirov_-_Zhyty_v_turbulentnomu_sviti.php
2. Бек, У. (2015). *Влада і контрвлада у добу глобалізації. Нова світова політична економія*. (О. Юдіна, Пер.). Ніка-центр. (Оригінал опубліковано 2002 р.)
3. Головаха, Є. (2025). *Виступ директора Інституту соціології на Сесії Загальних зборів Відділення історії, філософії та права НАН України*. https://isnasu.org.ua/news/news_item.php?id=vystup-dyrektora-na-sesii-zagalnyh-zboriv
4. *Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем*. (2024, 13 червня). Схвалено Постановою Кабінету Міністрів України № 684. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-p#Text>
5. Демидюк, О. О., Красота, О.В. Кирильчук, О.В., Погорілий, Я. А. (2025). Перспективи зеленої економіки в контексті інтеграції з ЄС: можливості та виклики для України. In *Theoretical and practical research in 2024*. Compiled by V. Shpak. S. Tabachnikov (Eds.), 191 p., (pp. 5-22). California. GS Publishing Services. DOI: 10.51587/9798-9917-51902-2025-021
6. Ємець М. (2024, 17 травня). *Рада Європи ухвалила першу конвенцію щодо штучного інтелекту*. <https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/05/17/7186177/>
7. Івасечко, О., Турчин Я., Цебенко, О. (2024). Загрози, сценарії та перспективи реалізації глобального лідерства ЄС щодо кліматичних змін в умовах сучасних викликів. *Вісник Львівського університету. Серія філос.-політолог. студії. 2024. Випуск 55*, с. 307-316. <https://doi.org/10.30970/PPS.2024.55.37>
8. Івасечко, О.Я., Цебенко, О.О. (2024). Глобальна стратегія ЄС Global Gateway: імплементація інфраструктурних проєктів на рівні ЄС-АСЕАН. У *Сталий розвиток ЄС – кращі практики для України*. (с.77-82). Національний університет «Львівська політехніка».
9. Інновації та безпека: ключові аспекти першого закону про штучний інтелект. (2024, 2 травня). <https://law.chnu.edu.ua/innovatsii-ta-bezpeka-kliuchovi-aspekty-zakonu-pro-shtuchnyi-intelekt/>
10. *Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні*. (2020, 2 грудня). Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1556-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-p/print>
11. Майструк, Н. (2024). Нові та старі ризики в контексті глобалізації та війни в Україні / Українська соціологічна думка в пошуках шляхів соціально-економічного розвитку. *Соціологія: теорія, методи, маркетинг*, 2024, 2, 178-204, 199-201.

12. Мюллер Н. (2023, 14 серпня). Штучний інтелект – нова екологічна загроза? <https://www.dw.com/uk/stuchnij-intelekt-nova-ekologichna-zagroza/a-66525523>
13. Скокова, Л. (2022). Системні ризики в нестабільному суспільстві: соціальні та культурно-інформаційні виміри. За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 22 грудня 2021 року. *Вісник НАН України*, 2022, №2, 44-56. http://jnas.nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2022_2_8.pdf
14. Соболева, К. (2024, 2 липня). *Штучний інтелект у лежачих законів: Мініфрм презентувало Білу книгу з регулювання ШІ в Україні*. <https://mind.ua/publications/20275687-shtuchnij-intelekt-u-leshchatah-zakonu-mincifri-prezentovalo-bilu-knigu-z-regulyuvannya-shi-v-ukrayini>
15. *Топ-5 шляхів розвитку «зеленої» економіки в Україні*. (2025, 5 травня). <https://economist.com.ua/top-5-ways-to-develop-a-green-economy-in-ukraine/>
16. Beck, U. (1986). *RISIKOGESELLSCHAFT. AUF DEM WEG IN EINE ANDERE MODERNE*. Suhrkamp.
17. Eurointegration. (б.д.). *У ЄС набув чинності Закон про штучний інтелект*. Взято 1 серпня 2024 з <https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/08/1/7191323/>
18. Habermas, J. (2004). *Der gespaltene Westen*. Suhrkamp Verlag.
19. WEF. *The Global Risks Report 2025*. (2025, 15 January). <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЛІДУ ВІД ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ МАЛОГО БІЗНЕСУ

Машевська Марта, Куліш Богдан
Національний університет "Львівська політехніка"
м. Львів, Україна
Marta.V.Mashevaska@lpnu.ua,
Bohdan.Kulish.mknem.2023@lpnu.ua

Abstract. The paper addresses the lack of accessible and user-friendly tools for assessing the environmental footprint of small businesses using alternative energy sources. A web-based platform is proposed to evaluate environmental impact and provide personalized recommendations for its reduction. The developed system is based on modern technologies such as .NET Core, ReactJS, and MSSQL, and uses a mathematical model that integrates key environmental indicators into a unified analysis system. A distinctive feature is the use of fuzzy logic methods and consideration of regional specifics, ensuring the accuracy, usability, and efficiency of automated environmental footprint monitoring.

Key words: ecological footprint, fuzzy logic, evaluation model

Анотація. У роботі розглянуто проблему відсутності доступних і зрозумілих інструментів для оцінки екологічного сліду суб'єктів малого бізнесу при використанні альтернативних джерел енергії. Запропоновано веб-платформу, що дозволяє оцінювати вплив на довкілля та отримувати персоналізовані рекомендації щодо його зменшення. Розроблена система базується на сучасних технологіях .NET Core, ReactJS та MSSQL і використовує математичну модель, яка об'єднує ключові екологічні показники в єдину

систему аналізу. Особливістю є застосування методів нечіткої логіки та врахування регіональних особливостей, що забезпечує точність, зручність та ефективність автоматизованого моніторингу екологічного сліду.

Ключові слова: екологічний слід, нечітка логіка, модель оцінювання

1. Огляд та аналіз предметної області

Сучасний розвиток глобальної економіки неможливий без зростання виробничих потужностей, що, в свою чергу, призводить до збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище. В Україні, як і в багатьох інших країнах, актуальною є проблема зменшення екологічного сліду, який утворюється внаслідок діяльності підприємств, зокрема малого бізнесу. Одним із важливих аспектів у зменшенні цього сліду є впровадження та ефективне використання альтернативних джерел енергії, раціональне використання природних ресурсів, таких як вода, а також оптимізація процесів транспортування та утилізації відходів.

Екологічний слід підприємств визначається як величина, що вимірює навантаження на природні ресурси та екосистеми в результаті виробничої та комерційної діяльності. Оскільки підприємства малого бізнесу часто не мають достатніх ресурсів для впровадження дорогих технологій з мінімізації шкідливого впливу на довкілля, це призводить до того, що вони часто не оцінюють у повному обсязі свій екологічний слід. Проте з розвитком цифрових технологій з'явилася можливість застосування інструментів, що дозволяють легко і швидко оцінити цей показник, а також отримати рекомендації щодо його зменшення.

Основні фактори, що впливають на екологічний слід малого бізнесу, включають використання енергії, транспортування, водні ресурси та управління відходами. Використання енергії є основним фактором, який впливає на екологічний слід, оскільки традиційні джерела енергії, такі як вугілля, нафта та газ, сприяють викидам парникових газів та забрудненню атмосфери. Однак альтернативні джерела енергії [1, 2], зокрема сонячна, вітрова, біоенергетика, допомагають значно зменшити цей вплив. Для малого бізнесу, який працює на обмежених ресурсах, важливим є використання доступних і ефективних рішень для переходу на зелені джерела енергії.

Транспорт є ще одним важливим аспектом, що суттєво впливає на екологічний слід підприємства. Використання різних видів пального, таких як бензин, дизель та газ, також є значущим джерелом забруднення навколишнього середовища. Особливо це стосується малого бізнесу, який часто має транспортні засоби для доставки товарів та послуг. Залежно від типу пального, використовованого на підприємстві, викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин можуть значно варіюватися, що безпосередньо впливає на загальний екологічний слід.

Використання води – ще один фактор, що визначає екологічний слід. Малий бізнес, який залежить від водних ресурсів для виробничих процесів, може вносити суттєвий вклад у виснаження місцевих водних запасів, що також має серйозний вплив на довкілля. З огляду на зростаючий дефіцит води в багатьох регіонах світу, ефективне використання водних ресурсів є важливим елементом у процесі зменшення екологічного сліду.

Продуктування відходів є ще одним важливим аспектом. Відходи можуть бути різними за типами: органічними, неорганічними, токсичними чи небезпечними для навколишнього середовища. Багато підприємств малого бізнесу не мають достатньої інфраструктури для їх правильної утилізації, що призводить до накопичення відходів і забруднення територій. Відсутність системи сортування та переробки відходів також впливає на екологічний слід підприємства.

Для зменшення екологічного сліду підприємств необхідно застосовувати систему моніторингу, яка б на основі зібраних даних визначала екологічний вплив різних виробничих процесів. Ця система повинна враховувати не тільки дані про використану енергію та

пально-мастильні матеріали, але й інформацію про спожиту воду, кількість та тип відходів, а також інші фактори, які можуть бути суттєвими для конкретного бізнесу.

Особливу роль у зменшенні екологічного сліду відіграють регіональні коефіцієнти абсорбції [3], які враховують специфіку географічних, екологічних та економічних умов регіону. Наприклад, в одному регіоні можна застосовувати більш ефективні методи утилізації відходів, в іншому – використовувати дешевші та доступніші альтернативи джерелам енергії. Тому, при розробці платформ для оцінки екологічного сліду необхідно брати до уваги місцеві умови та адаптувати інструменти для різних регіонів.

Використання таких платформ дає можливість малим підприємствам отримати не тільки оцінку свого екологічного сліду, але й рекомендації щодо того, як зменшити негативний вплив на довкілля. Рекомендації можуть стосуватися переходу на альтернативні джерела енергії, зменшення використання водних ресурсів, оптимізації процесів транспортування, а також поліпшення управління відходами. Це дозволяє підприємствам не тільки зменшити своє навантаження на довкілля, але й підвищити свою конкурентоспроможність на ринку, де все більше значення має екологічна відповідальність.

Загалом, розробка і впровадження системи для оцінки екологічного сліду малого бізнесу є важливим кроком на шляху до сталого розвитку [4]. Вона дозволяє підприємцям отримувати точні та надійні дані для прийняття рішень щодо зменшення свого екологічного впливу. Водночас така система допомагає сприяти формуванню екологічної свідомості серед підприємців, що в довгостроковій перспективі може позитивно вплинути на стан навколишнього середовища на регіональному та глобальному рівнях.

Таким чином, екологічний слід малого бізнесу є комплексним показником, що відображає вплив різних аспектів діяльності підприємства на навколишнє середовище. Розробка інструментів для оцінки цього сліду дозволяє не тільки зменшити екологічний вплив, але й забезпечити сталий розвиток для підприємств, що стає важливим аспектом сучасної економіки.

2. Актуальність та мета досліджень

Актуальність цієї роботи зумовлена потребою створення інтегрованої платформи, яка надає можливість оцінювати екологічний слід на основі ключових параметрів: споживання електроенергії, палива, води та утворення відходів. Сучасний підхід до вирішення цієї проблеми включає використання алгоритмів нечіткої логіки для автоматизації розрахунків та надання персоналізованих рекомендацій. Такий підхід дозволяє підприємствам не лише оцінювати свій вплив на довкілля, а й зменшувати його шляхом впровадження раціональних та екологічно дружніх рішень.

Мета роботи полягає у створенні платформи для оцінки екологічного сліду малого бізнесу з використанням сучасних алгоритмів аналізу. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання: здійснити аналіз сучасних методів оцінки екологічного сліду, розробити модель на основі нечіткої логіки, спроектувати структуру модульного моноліту для системи та впровадити зручний інтерфейс користувача для автоматизації процесів.

Об'єктом дослідження є діяльність малого бізнесу, пов'язана зі споживанням ресурсів та утворенням відходів. Предметом дослідження є процес розробки платформи, що об'єднує розрахункові та аналітичні інструменти для зменшення екологічного сліду. Загалом, ідея роботи полягає у створенні інтегрованого рішення, яке дозволяє не лише аналізувати вплив діяльності, а й автоматично пропонувати ефективні заходи для його зниження.

Запропонована система спрямована на підвищення екологічної обізнаності суб'єктів малого бізнесу та сприяння їхньому переходу до сталих практик, що має вагоме значення для гармонійного співіснування економічного розвитку та збереження довкілля.

3. Формування інформаційної моделі об'єкта дослідження

Для оцінки екологічного сліду було сформовано інформаційну модель, яка включає основні параметри, що впливають на екологічний слід суб'єктів малого бізнесу. Вибір цих параметрів базується на ключових аспектах впливу людської діяльності на довкілля та специфіці споживання ресурсів у малих підприємствах.

Електроенергія (electricity) – обсяг спожитої електроенергії (вимірюється в кіловат-годинах). Цей параметр був обраний, оскільки електроенергія є одним із основних джерел викидів CO₂, особливо у разі її виробництва з використанням викопного палива. Альтернативні джерела енергії можуть суттєво зменшити екологічний слід, тому цей параметр є критично важливим.

Паливо (fuel) – кількість спожитого пального (вимірюється в літрах). Використання викопного палива, такого як бензин, дизель чи газ, є основним джерелом викидів CO₂ у транспорті та деяких видах виробничої діяльності. Врахування цього параметра дозволяє оцінити вплив транспорту на екологічний слід підприємства.

Вода (water) – обсяг спожитої води (вимірюється в кубічних метрах). Вода є важливим ресурсом, використання якого пов'язане з впливом на водні екосистеми. Забір великих обсягів води та її скидання після використання можуть впливати на екосистему регіону, тому цей параметр включено до моделі.

Відходи (waste) – обсяг утворених відходів (вимірюється в кілограмах). Відходи, утворені підприємством, часто стають джерелом забруднення, особливо якщо вони містять небезпечні або біологічно активні матеріали. Цей параметр дозволяє оцінити вплив підприємства на ґрунти, води та повітря.

Вихідний параметр "екологічний слід" (eco_footprint) – це інтегральний показник, який відображає сумарний вплив підприємства на довкілля. Він вимірюється на шкалі від 0 до 100, де 0 означає мінімальний вплив, а 100 – критично високий. Цей показник обчислюється на основі нечіткої логіки, яка враховує всі вхідні параметри.

Вибір цих параметрів зумовлений їхньою універсальністю та релевантністю для оцінки екологічного сліду в різних регіонах і для різних типів малого бізнесу. Вони охоплюють основні джерела впливу на довкілля, включаючи споживання енергетичних ресурсів, вплив на водні ресурси та утворення відходів. Інформаційна модель дозволяє гнучко адаптувати систему до специфіки діяльності кожного підприємства та забезпечує комплексну оцінку екологічного сліду.

4. Приклад реалізації завдання в середовищі MatLab з використанням Fuzzy Logic Toolbox

Для реалізації контролера нечіткої логіки в середовищі MATLAB використовувався Fuzzy Logic Toolbox, який забезпечує інструменти для створення, моделювання та візуалізації нечітких систем. Нижче наведено основні етапи роботи в MATLAB.

Першим етапом реалізації було саме створення системи нечіткої логіки.

У наступному етапі система створюється в MATLAB за допомогою графічного інтерфейсу FIS Editor. Було визначено чотири вхідні змінні (electricity, fuel, water, waste) та одна вихідна змінна (eco_footprint).

Після цього кожна змінна була налаштована з трьома функціями належності (low, medium, high) для вхідних параметрів та вихідного показника.

Далі було проведено налаштування функцій належності. Функції належності задавалися у вигляді трапецієвидних і трикутних форм. Їхні параметри визначалися відповідно до діапазонів, зазначених у моделі Python. Налаштування здійснювалося через вкладку Membership Function Editor.

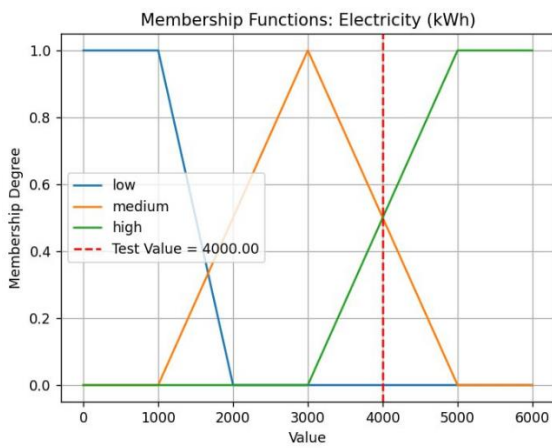


Рисунок 1. Графік змінної electricity

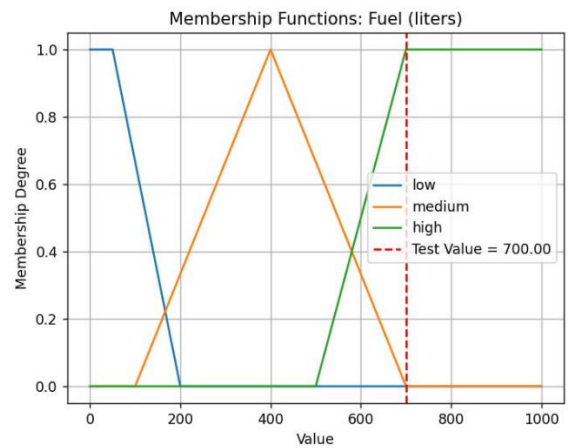


Рисунок 2. Графік змінної fuel

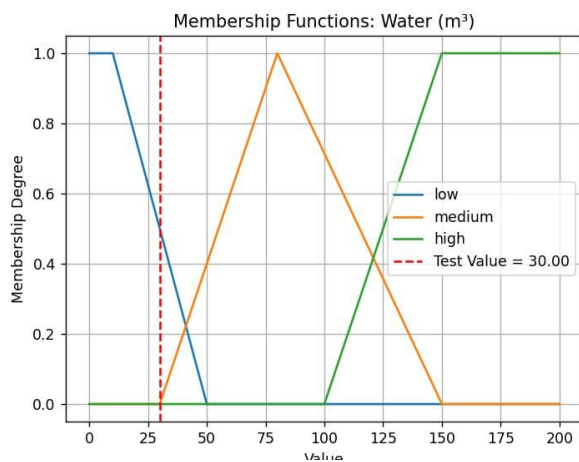


Рисунок 3. Графік змінної water

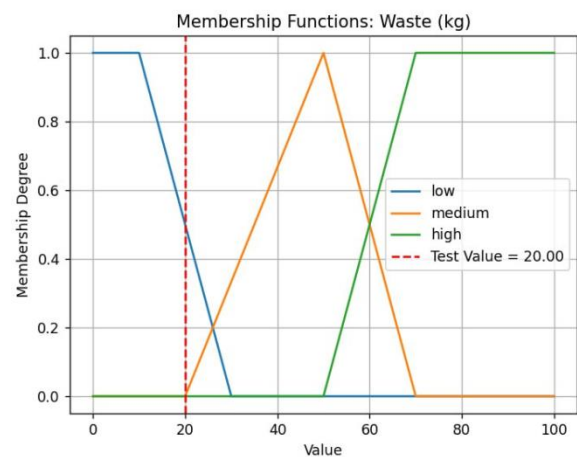


Рисунок 4. Графік змінної waste

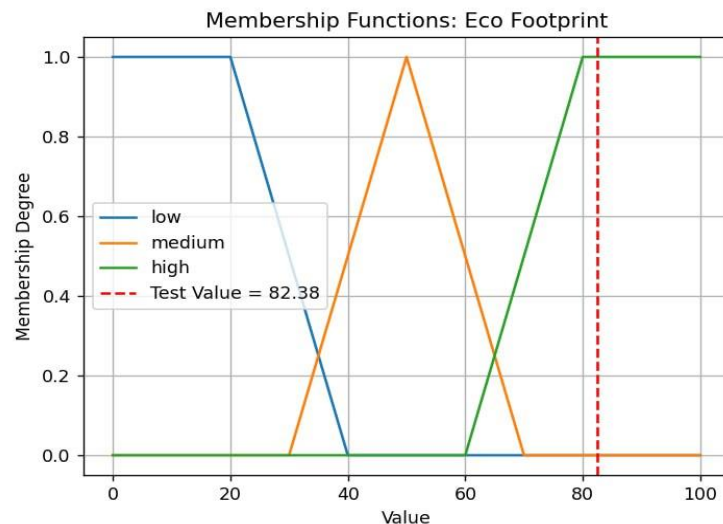


Рисунок 5. Функція належності для екологічного сліду

Для створення контролера нечіткої логіки використовувалися правила, які встановлюють взаємозв'язок між вхідними параметрами (електроенергія, паливо, вода, відходи) та вихідним показником (екологічний слід). Правила побудовані на основі логічних припущень, що враховують взаємний вплив різних рівнів споживання ресурсів.

Нижче наведено приклад сформованих нечітких правил для системи:

1. Якщо параметр "електроенергія" низький і параметр "паливо" низький і параметр "вода" низький і параметр "відходи" низький, то екологічний слід низький.
2. Якщо параметр "електроенергія" середній і параметр "паливо" низький і параметр "вода" низький і параметр "відходи" низький, то екологічний слід низький.
3. Якщо параметр "електроенергія" середній і параметр "паливо" середній і параметр "вода" низький і параметр "відходи" середній, то екологічний слід середній.
4. Якщо параметр "електроенергія" високий і параметр "паливо" низький і параметр "вода" низький і параметр "відходи" низький, то екологічний слід середній.
5. Якщо параметр "електроенергія" низький і параметр "паливо" високий і параметр "вода" високий і параметр "відходи" високий, то екологічний слід високий.

Ці правила базуються на логіці, яка враховує рівні споживання ресурсів і їхній вплив на загальний екологічний слід. Вони використовуються у системі нечіткої логіки для визначення вихідного показника на основі введених даних.

Після додавання правил була виконана перевірка їхньої узгодженості.

Ще одним етапом було моделювання системи. У вкладці Rule Viewer система була протестована на тестових даних. Значення змінних вводилися вручну, а результуюче значення вихідного показника відображалось у вигляді інтерактивної діаграми.

В результаті використання Fuzzy Logic Toolbox вдалося:

- визначити залежності між вхідними параметрами та вихідним показником;
- візуалізувати функції належності, правила та результуючі значення;
- перевірити коректність моделі на основі тестових даних.

Таким чином, виконана робота показала ефективність інтеграції математичного моделювання та сучасних інструментів для вирішення завдань оцінки екологічного впливу. Сформована система не лише дозволяє аналізувати поточний стан, але й відкриває перспективи для подальшого вдосконалення шляхом адаптації моделі до нових вхідних параметрів або додаткових умов.

5. Проектування основних модулів проекту

Розробка платформи для оцінки екологічного сліду від використання альтернативних джерел енергії спрямована на створення інструменту, який забезпечить підприємствам доступ до ефективних рішень для аналізу їхнього екологічного впливу та отримання рекомендацій щодо його зменшення. Особливістю цього проекту є не лише надання можливості оцінки викидів та використання ресурсів, але й інтеграція регіональних екологічних даних для підвищення точності розрахунків.

Одним із ключових аспектів є вибір архітектури та технологій для реалізації платформи. Вона має бути гнучкою, масштабованою та забезпечувати високу продуктивність, враховуючи складність задач, таких як розрахунок екологічного сліду, інтеграція з зовнішніми джерелами даних, візуалізація результатів і створення персоналізованих рекомендацій. У цьому контексті архітектурний підхід модульного моноліту з використанням Clean Architecture, принципів Domain-Driven Design (DDD) та сучасних технологій, таких як .NET Core, ReactJS і MSSQL, стає оптимальним вибором.

Вибір архітектури відіграє ключову роль у розробці інформаційної системи, визначаючи її гнучкість, продуктивність і зручність у підтримці. Для платформи, яка має оцінювати екологічний слід малого бізнесу, було вирішено використати архітектуру модульного моноліту. Цей підхід дозволяє поєднувати переваги традиційного моноліту, такі як простота розгортання та підтримка, із модульністю, яка сприяє логічному розподілу коду та його незалежному вдосконаленню.

Архітектура модульного моноліту передбачає побудову всієї системи в межах одного застосунку з розподілом функціональності на окремі модулі. Кожен модуль відповідає за певну область бізнес-логіки, що полегшує управління кодом та дозволяє розробляти, тестувати і модифікувати компоненти незалежно. Такий підхід ідеально підходить для систем, які потребують тісної взаємодії між компонентами, як у випадку цієї платформи.

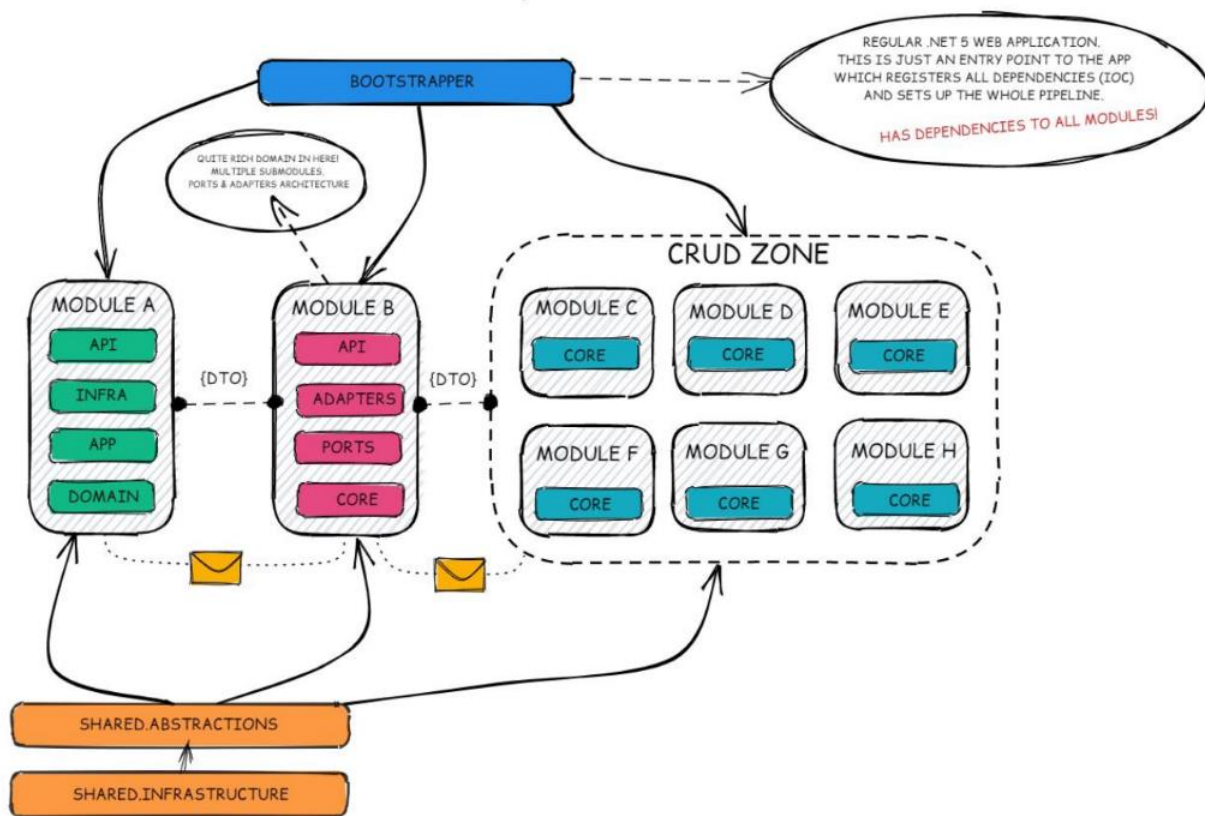


Рисунок 6. Схема модульного моноліту

Однією з основних причин вибору цієї архітектури є збереження цілісності системи, адже всі модулі знаходяться в межах однієї кодової бази. Це суттєво спрощує процеси інтеграції, розгортання та управління, що є особливо важливим на початкових етапах розробки. Усі частини системи доступні в одному середовищі, тому тести, розгортання нових функцій та відстеження помилок можуть виконуватись без зайвих ускладнень. У випадку з платформою екологічного сліду це дає змогу швидко впроваджувати та перевіряти нові модулі, наприклад, обчислення екологічного впливу чи створення персоналізованих рекомендацій.

Другою важливою перевагою є зменшення складності інтеграції. Оскільки всі компоненти системи взаємодіють через чітко визначені інтерфейси в межах однієї програми, інтеграція між модулями відбувається без складних механізмів комунікації. Наприклад, модуль збору даних про джерела забруднення передає інформацію безпосередньо до модуля обчислення екологічного сліду, що гарантує узгодженість і цілісність даних. Таке рішення усуває проблеми, які могли б виникнути при використанні розподіленої архітектури, де комунікація між сервісами потребує зовнішніх механізмів передачі даних.

Модульний моноліт також забезпечує гнучкість у масштабуванні. Незважаючи на те, що монолітна архітектура традиційно вважається менш гнучкою порівняно з мікросервісами, поділ на модулі дозволяє легко вдосконалювати окремі частини системи. Наприклад, якщо логіка рекомендацій потребуватиме значних змін або розширень, це можна реалізувати, не зачіпаючи модулі авторизації чи введення даних. Крім того, у разі зростання навантаження або складності системи, окремі модулі можна поступово виділяти в незалежні сервіси без втрати загальної структури.

Іншою важливою перевагою модульного моноліту є ефективність у використанні ресурсів. Оскільки всі модулі функціонують у межах однієї програми, це виключає необхідність підтримувати кілька серверів для кожного сервісу, як це було б у мікросервісній архітектурі. У контексті даної платформи, яка обробляє великі обсяги даних про джерела

енергії, викиди та рекомендації, такий підхід забезпечує високу продуктивність без зайвих витрат на інфраструктуру.

Серед інших переваг модульного моноліту варто відзначити зручність підтримки. Завдяки чітко визначеним межах модулів зміни в одному компоненті, наприклад, у модулі інтеграції з регіональними API, не впливають на інші. Це робить підтримку системи більш передбачуваною та менш ризикованою, навіть при роботі невеликої команди розробників.

Обраний підхід дозволяє уникнути багатьох складнощів, характерних для мікросервісної архітектури, таких як керування багатьма незалежними сервісами чи їхня взаємодія через зовнішні механізми. Водночас система зберігає гнучкість, необхідну для поступового вдосконалення та масштабування. Модульний моноліт став оптимальним вибором для платформи, яка повинна забезпечувати високу продуктивність, легкість адаптації до змін і зручність для розробників та кінцевих користувачів.

Список модулів із відповідальностями.

1. Identity:

- забезпечення управління користувачами: реєстрація, авторизація, автентифікація;
- обробка даних користувачів, включаючи верифікацію електронної пошти та багатофакторну автентифікацію;
- надання токенів доступу для інших модулів системи через механізми безпеки (JWT).

2. Pollutants:

- збір та обробка даних про джерела забруднення, включаючи викиди CO₂, споживання пального, використання води та утворення відходів;
- інтеграція із зовнішніми джерелами даних про середні показники забруднення;
- надання цих даних модулю Footprints для розрахунків.

3. Footprints:

- виконання розрахунків екологічного сліду на основі введених даних;
- врахування регіональних коефіцієнтів абсорбції та інших параметрів, таких як тип джерела енергії;
- порівняння поточного екологічного впливу з прогнозованими результатами при впровадженні альтернативних рішень.

4. Regions:

- зберігання та обробка географічних даних, включаючи регіональні коефіцієнти викидів і абсорбції;
- інтеграція з API для отримання актуальних даних про екологічні параметри в різних регіонах;
- надання цих даних для модулів Footprints і Recommendations.

5. EnergySources:

- управління даними про джерела енергії, які використовує бізнес (традиційні та альтернативні);
- зберігання виборів користувачів щодо типів енергетичних джерел, таких як сонячна, вітрова чи геотермальна енергія;
- взаємодія з модулем Footprints для врахування енергетичних рішень у розрахунках.

6. Recommendations:

- генерація індивідуальних рекомендацій на основі результатів розрахунків екологічного сліду;
- надання порад щодо впровадження альтернативних джерел енергії, оптимізації споживання ресурсів та зменшення відходів;
- врахування регіональних та бізнес-специфічних факторів при формуванні рекомендацій.

Clean Architecture забезпечує структуровану багатошарову архітектуру, яка дозволяє створювати гнучкі, легко масштабовані та незалежні від інфраструктури системи. У реалізованій платформі цей підхід реалізується через чотири основні шари:

- Domain – центральний шар, який містить основні бізнес-правила та моделі, незалежні від зовнішніх технологій.
- Application – відповідає за сценарії використання, координуючи роботу між іншими шарами.
- Infrastructure – реалізує взаємодію з базами даних, API та іншими зовнішніми системами.
- Presentation – надає доступ до функціоналу через API, яке використовується зовнішніми клієнтами, такими як веб- чи мобільні додатки.

Ця структура гарантує, що бізнес-логіка залишається ізольованою від інфраструктурних деталей, що забезпечує незалежність від вибору технологій.

У платформі шар Domain зосереджується на бізнес-правилах, які визначають поведінку системи. Тут розміщені моделі, такі як джерела енергії, регіони, користувачі, а також правила для розрахунку екологічного сліду. Цей шар не залежить від деталей реалізації інфраструктури чи інтерфейсу API, що дозволяє використовувати його повторно в інших проєктах або компонентах.

Шар Application виконує роль посередника між зовнішніми запитами та бізнес-логікою. Він визначає сценарії використання, наприклад, обчислення екологічного сліду, збереження вибору джерел енергії чи генерацію рекомендацій. Цей шар орієнтований на процеси та координує взаємодію між Domain, Presentation і Infrastructure, забезпечуючи послідовність виконання бізнес-операцій.

Шар Infrastructure забезпечує реалізацію доступу до бази даних MSSQL, інтеграцію з API для отримання регіональних коефіцієнтів викидів та інструменти для логування. Він реалізує інтерфейси, визначені в Application, і дозволяє зберігати дані, взаємодіяти з іншими системами або виконувати інші інфраструктурні завдання. Наприклад, цей шар обробляє запити до бази даних, надаючи шарові Application можливість працювати з агрегованими даними, не занурюючись у деталі SQL-запитів.

Шар Presentation надає зовнішній інтерфейс через RESTful API. Усі запити до системи – введення даних, отримання результатів чи доступ до звітів – проходять через цей шар. API орієнтований на підтримку фронтенду або мобільних додатків, але сам Presentation не містить бізнес-логіки. Його роль обмежується обробкою запитів, валідацією даних і передачею їх до шару Application.

У платформі шари Clean Architecture взаємодіють у добре структурованому порядку. Наприклад, коли користувач через API надсилає запит на обчислення екологічного сліду, цей запит проходить через шар Presentation, де дані валідуються. Далі запит передається до шару Application, який викликає відповідний сценарій використання. Цей сценарій отримує бізнес-логіку із Domain і використовує Infrastructure для доступу до необхідних даних, таких як регіональні коефіцієнти абсорбції чи історія споживання енергії.

У реалізованій платформі DDD допомагає створити систему, що точно відображає потреби бізнес-домену. Усі компоненти домену – моделі, правила, сценарії – розроблені з урахуванням реальних потреб користувачів і контексту їхньої діяльності. Основний фокус DDD – це створення доменної моделі, яка відповідає специфіці обчислення екологічного сліду малого бізнесу.

DDD у платформі реалізується через чітке моделювання основних сутностей. Наприклад, джерела енергії та регіони є базовими елементами домену, тоді як коефіцієнти абсорбції або правила розрахунків є їхніми властивостями. Агрегати забезпечують транзакційну узгодженість між сутностями. Наприклад, агрегат для екологічного сліду користувача містить дані про споживання енергії, регіональні коефіцієнти та результати розрахунків.

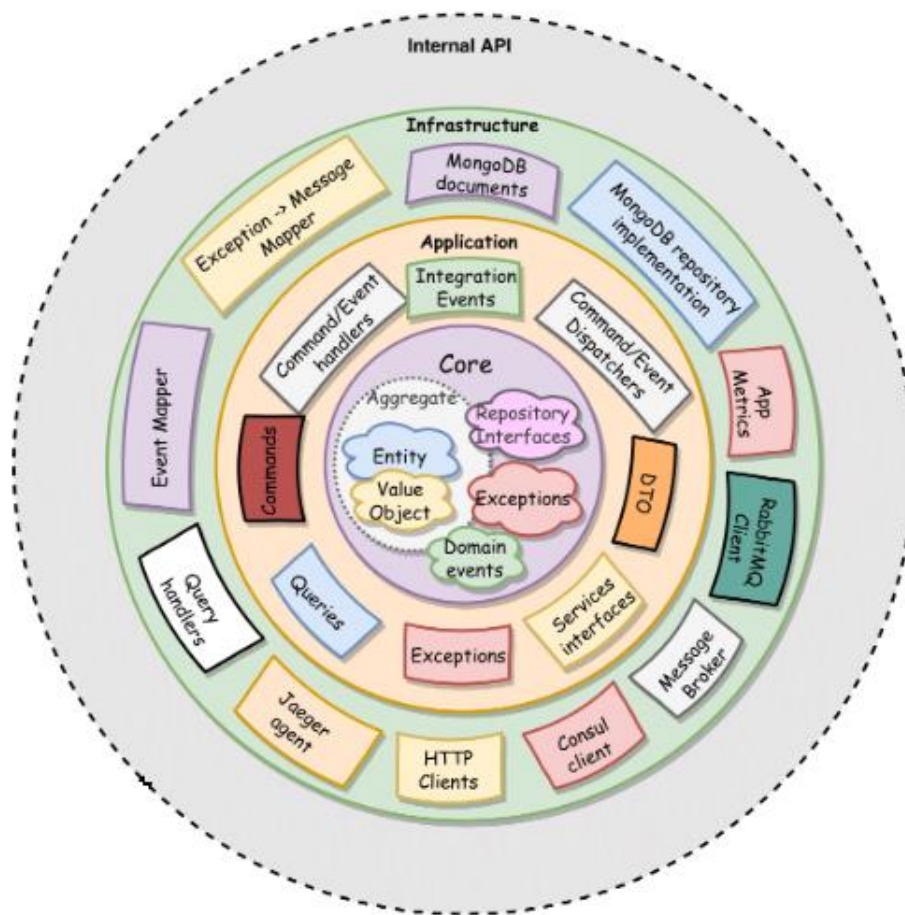


Рисунок 7. Схема реалізації модулів проекту

Для створення інтерактивних графіків і діаграм платформа використовує бібліотеку Chart.js. Це забезпечує користувачам зручну візуалізацію результатів розрахунків, наприклад, змін екологічного сліду з часом або порівняння впливу різних джерел енергії.

Для реалізації платформи обрано MS SQL як основну систему управління базами даних (СУБД), що забезпечує високу продуктивність, надійність та масштабованість. MS SQL ідеально підходить для складних бізнес-додатків, які потребують зберігання великих обсягів структурованих даних із забезпеченням транзакційної узгодженості.

Основна роль MS SQL у платформі – це зберігання даних про користувачів, джерела енергії, регіони та результати обчислень екологічного сліду. Вона підтримує складні реляційні запити, необхідні для обчислення впливу, аналізу споживання ресурсів та генерації рекомендацій. Завдяки підтримці індексування MS SQL забезпечує високу швидкість вибірок, що критично важливо для динамічних запитів у модулі рекомендацій.

MS SQL також інтегрується з Entity Framework Core, що дозволяє використовувати ORM (Object-Relational Mapping) для взаємодії з базою даних на рівні об'єктів. Це спрощує розробку, забезпечуючи одночасно підтримку складних транзакцій та консистентність даних. Завдяки розширеній підтримці безпеки, такої як шифрування даних, MS SQL гарантує захист критичної інформації користувачів платформи.

Docker забезпечує контейнеризацію платформи, що дозволяє розгортати додаток у будь-якому середовищі з мінімальними налаштуваннями. Контейнери ізолюють сервіси, такі як бекенд, база даних і фронтенд, зменшуючи ризики конфліктів залежностей. Docker Compose спрощує управління мультиконтейнерними додатками, дозволяючи швидко налаштовувати та запускати всю екосистему платформи.

6. Проектування баз даних системи

У платформі для оцінки екологічного сліду використання п'яти баз даних виправдане модульною монолітною архітектурою. Основна ідея модульного моноліту полягає в тому, щоб розділити логіку на чітко ізольовані модулі, кожен із яких відповідає за свій функціонал. Незалежність модулів дозволяє уникнути конфліктів даних і спрощує масштабування та підтримку системи.

П'ять баз даних використовуються для забезпечення розділення відповідальності між різними модулями: Regions, Sources, Pollutants, Identity, Footprints. Це рішення дозволяє кожному модулю мати власний контекст даних, зберігати лише необхідну інформацію та уникати дублювання даних. Наприклад, модуль Identity забезпечує безпеку, а модуль Footprints відповідає за обчислення екологічного впливу, але вони взаємодіють лише через чітко визначені інтерфейси.

1. База даних Sources

➤ Region:

- таблиця для регіонів у контексті джерел енергії;
- містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - Name: назва регіону.

➤ Source:

- таблиця для джерел енергії;
- містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - Name: назва джерела енергії;
 - EnergyType: тип енергії (у вигляді перерахування);
 - CO2Emissions: викиди вуглецю на одиницю енергії.

➤ UserEnergyChoice:

- таблиця для вибору джерел енергії користувачами;
- містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - Consumption: споживання енергії;
 - ConsumptionDate: дата споживання;
 - RegionId: ідентифікатор регіону;
 - UserId: ідентифікатор користувача;
 - SourceId: посилання на джерело енергії.

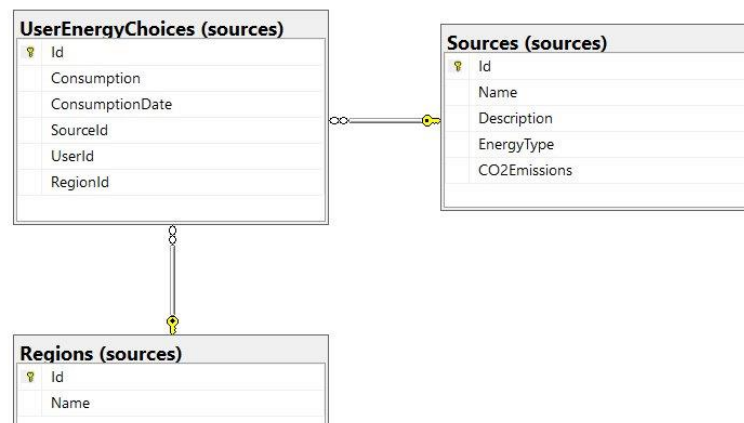


Рисунок 8. Схема бази даних Sources модулю

2. База даних Pollutants

- Carbon:
 - таблиця для викидів вуглецю;
 - містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - EmissionsPerUnit: викиди на одиницю споживання;
 - RegionId: ідентифікатор регіону;
 - SourceId: ідентифікатор джерела енергії.
- TransportEmission:
 - таблиця для викидів транспорту;
 - містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - Distance: відстань у км;
 - ConsumedFuel: витрачене паливо;
 - UsageDate: дата використання;
 - TransportId: ідентифікатор транспорту;
 - RegionId: ідентифікатор регіону.
- Transport:
 - таблиця для транспортних засобів;
 - містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - FuelType: тип пального;
 - CarbonPerUnit: викиди вуглецю на одиницю пального;
 - Type: тип транспорту.
- Waste:
 - таблиця для відходів;
 - містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - WasteType: тип відходів;
 - Produced: обсяги відходів;
 - CollectionTime: час збирання;
 - RegionId: ідентифікатор регіону.
- Water:
 - таблиця для водних викидів;
 - містить такі поля:
 - Id: унікальний ідентифікатор;
 - ConsumptionDate: дата споживання води;
 - Used: споживана кількість води.

Така структура дозволяє підвищити продуктивність, оскільки кожен модуль взаємодіє зі своєю базою даних без зайвих залежностей від інших. Це також забезпечує можливість масштабування окремих модулів залежно від навантаження. У разі внесення змін у функціонал одного модуля (наприклад, оновлення розрахунків у Footprints) зміни не впливатимуть на бази даних інших модулів, що мінімізує ризики виникнення помилок і спрощує підтримку системи.

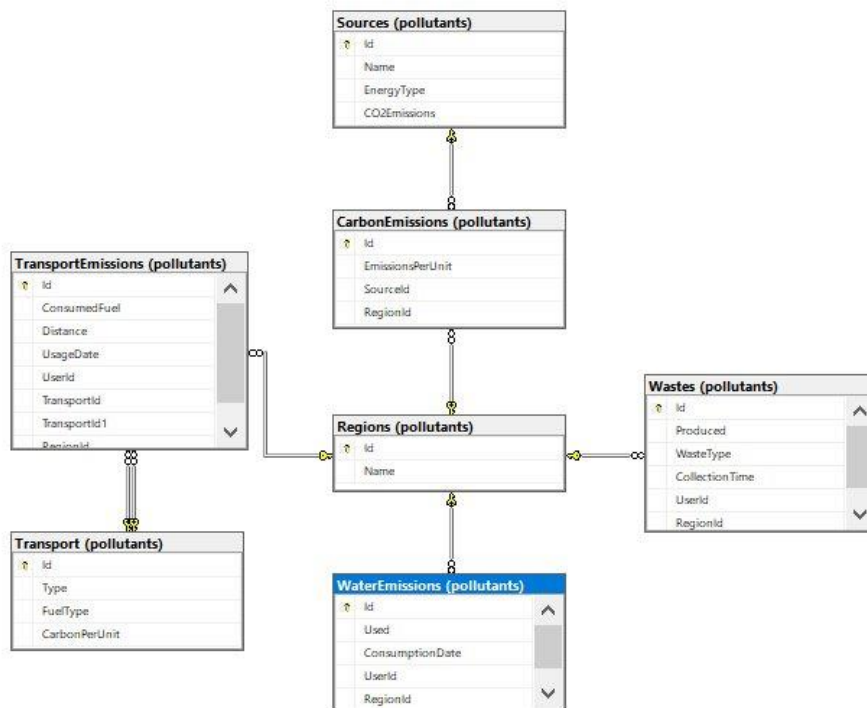


Рисунок 9. Схема бази даних Pollutants модулю

7. Представлення функціоналу розробленої системи

Розроблена система для оцінки екологічного сліду малого бізнесу об'єднує кілька ключових функціональних компонентів, які спрямовані на автоматизацію збору, обробки та аналізу екологічних даних. Основна мета системи полягає в наданні користувачам точних розрахунків екологічного сліду та персоналізованих рекомендацій, що сприяють сталому розвитку та зменшенню негативного впливу на довкілля.

Першим і основним функціоналом є обрахунок екологічного сліду. Система використовує введені користувачем дані про споживання електроенергії, палива, води та утворення відходів. На основі цих даних із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки здійснюється аналіз впливу на довкілля, результати якого обчислюються у вигляді екологічного сліду. Параметри розрахунків враховують регіональні коефіцієнти викидів, що забезпечує актуальність і точність обчислень. Після завершення розрахунків система автоматично відображає результати у зрозумілому вигляді, що дозволяє користувачам швидко оцінити свій вплив на навколишнє середовище.

Рисунок 10. Сторінка “Опитувальник”

Другим ключовим функціоналом є надання рекомендацій щодо зменшення екологічного сліду. Система аналізує результати обрахунків і автоматично генерує поради, які допомагають користувачам оптимізувати їхню діяльність. Наприклад, рекомендації можуть стосуватися встановлення енергоефективного обладнання, переходу на альтернативні джерела енергії, зменшення використання води або впровадження кращих методів утилізації відходів. Цей компонент допомагає користувачам не лише отримувати інформацію про поточний стан, а й планувати конкретні кроки для покращення екологічної ситуації.

Третім важливим елементом системи є візуалізація змін споживання ресурсів. Користувачі мають доступ до графіків, які відображають динаміку використання електроенергії, води, транспортування та утворення відходів. Ці графіки створені з використанням сучасних інструментів візуалізації, що дозволяють легко відстежувати тенденції та порівнювати різні періоди.

Наприклад, користувач може побачити, як змінювалося його споживання електроенергії протягом року або як впровадження рекомендацій вплинуло на зменшення відходів. Візуалізація також включає можливість деталізації для більш глибокого аналізу.

AlternativeEnergy

Home

Pollutants

Footprints

Regions

Sign in

Sign up

Id	Name	Actions
54b8abe3-83dc-4583-9190-31f09826d740	Eastern Europe	 
55297782-7a35-433b-8f47-841a62b86fb8	UK South	 
f96e1301-5abc-4507-93f3-c5e9f2ed3ed8	North Central US	 
17849306-411f-4028-ac5c-ce7885c64d70	West Europe	 
078158fe-1855-4951-8a06-d64adf8a65f4	India South	 

AlternativeEnergy

Product

Features

Testimonials

FAQs

Company

About us

Press

Legal

Terms

Privacy

Contacts

Рисунок 11. Сторінка менеджменту регіонами

AlternativeEnergy	Home	Pollutants	Footprints	Regions	Sign in	Sign up
Estimated eco footprint is 84.7 ha						
Your eco footprint is higher than 73.6% of businesses						
Electricity						
To reduce electricity pollution, invest in renewable energy sources such as solar, wind, and hydro power to replace fossil fuel-based generation. Enhance energy efficiency by adopting energy-saving appliances and implementing smart grid technologies. Encourage consumers and industries to reduce energy consumption through incentives and educational programs, thereby decreasing the overall environmental impact of electricity production.						
Transportation						
To reduce transportation pollution, promote the use of public transit, cycling, and walking for daily commutes. Encourage the adoption of electric vehicles by expanding charging infrastructure and offering incentives. Implement carpooling programs and invest in cleaner fuel technologies to lessen the environmental impact of transportation.						
Wastes						
To reduce waste pollution, prioritize recycling and composting to minimize landfill usage. Encourage the reduction of single-use plastics by promoting reusable alternatives and implementing bans or taxes on disposable items. Invest in public education campaigns to raise awareness about waste reduction and proper disposal methods. Support the development of waste-to-energy technologies to efficiently manage and repurpose unavoidable waste.						
Water						
To reduce water pollution, enforce stricter regulations on industrial discharges and ensure proper treatment of wastewater before it enters natural water bodies. Promote sustainable agricultural practices that minimize the use of pesticides and fertilizers to prevent harmful runoff. Encourage communities to reduce plastic usage and improve waste						

Рисунок 12. Сторінка рекомендацій

Окрім цього, система пропонує гнучкі налаштування, які дозволяють користувачам адаптувати її під власні потреби. У розділі налаштувань можна змінити особисті дані, зокрема регіон і тип діяльності, а також обрати переваги для розрахунків, такі як стандартні показники витрат чи регіональні коефіцієнти. Налаштування також дозволяють керувати параметрами сповіщень, зокрема частотою отримання повідомлень або їх типом (email, push). Завдяки цьому користувачі можуть налаштувати систему для максимальної зручності й ефективності.

Функціонал системи забезпечує користувачам не лише інструменти для моніторингу та оцінки екологічного сліду, але й засоби для його активного зменшення. Інтуїтивний інтерфейс, автоматизація розрахунків і рекомендацій, а також якісна візуалізація даних роблять систему ефективним інструментом для сталого розвитку малого бізнесу.

Розробка цієї платформи дає можливість малому бізнесу знижувати свій екологічний слід, оптимізувати витрати на ресурси та покращувати свою конкурентоспроможність. Завдяки простому й інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу система легко адаптується до потреб користувачів, забезпечуючи їх інструментами для аналізу та впровадження змін.

У майбутньому система може бути розширена для врахування додаткових факторів, таких як типи транспортних засобів, специфіка кліматичних умов або індивідуальні бізнес-процеси. Такі вдосконалення сприятимуть ще більшій точності аналізу та підвищенню ефективності впровадження екологічних інновацій.

1. Sorensen, B. (2017). Renewable Energy: Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics and Planning (5th ed.). Academic Press.

2. M. Dholariya, A. Patel, C. Dalal, H. Patel (2025). The Role of Renewable Energy in Achieving Sustainable Energy Goals. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. pp. 171-175. DOI: 10.48175/IJARSC-25033.

3. Wackernagel, M., Hanscom, L., & Lin, D. (2019). Ecological footprint: Managing our biocapacity budget. New Society Publishers.

4. I. Nasim, Bashir, Furrukh, M. Ramzan (2025). Agricultural Footprint Dynamics: Capturing the Influence of Renewable Energy, Urbanization, and Ecological Resources. iRASD Journal of Energy & Environment. V. 6, pp. 1-14. DOI: 10.52131/jee.2025.0601.0051.

МОДУЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ СОЗОЛОГІЧНИХ БАЗ ДАНИХ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «ПІВНІЧНЕ ПОДІЛЛЯ»

Мокрий Володимир

Національний університет «Львівська політехніка»,

Львів, Україна

volodymyr.i.mokriy@lpnu.ua

Арустамян Едуард

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України,

Київ, Україна

info@mepr.gov.ua

Бондарь Валерія

Національний університет біоресурсів і природокористування України,

Київ, Україна

plantprotect_dean@nubip.edu.ua

Анотація. Розглянуто технології інформаційного забезпечення формування багатомодульної структури організації фітоценотичної бази даних Національного природного парку «Північне Поділля». Результати созіологічної оцінки забезпечують

фактичне наповнення фітоценотичних модулів баз даних. Пропоновані алгоритми автоматизації синтаксономічної діагностики рослинності ідентифікують у її складі рідкісні та зникаючі види, що необхідно для збереження біотичного різноманіття Північного Поділля в контексті сталого розвитку регіону.

Ключові слова: бази даних, рослинність, созологічний аналіз, біорізноманіття.

Abstract. The technologies of information support of formation of multi-module structure of organization of phytocenotic database of National Nature Park «Northern Podillya» are considered. The results of sozological assessment provide actual filling of phytocenotic modules of databases. The proposed algorithms of automation of syntaxonomic diagnostics of vegetation identify rare and endangered species in its composition, which is necessary for preservation of biotic diversity of Northern Podillya in the context of sustainable development of the region.

Keywords: databases, vegetation, sozological analysis, biodiversity.

Реалізація суспільством підходів до охорони біологічного різноманіття є його важливою цивілізаційною характеристикою і маркером зрілості. Урядами багатьох країн світу розробляються програми сповільнення або й зупинки деградації природних угруповань, втрат видів чи популяцій з їхніми унікальними генетичними особливостями – від перегляду національних природоохоронних законодавств до участі в міждержавних угодах та виділення фінансування з метою захисту біологічного різноманіття на всій планеті. Такі зусилля насамперед зорієнтовані на охорону і збереження раритетних видів і їхніх оселищ як найуразливіших компонентів екосистем.

Світова та вітчизняна практика використання інформаційних технологій у дослідженнях довкілля базується на використанні великих масивів даних є неодмінним атрибутом комплексного пізнання об'єктів та явищ природи, зокрема і рослинності [1]. В науково-технічній літературі накопичено чимало інформаційних описових даних рослинних угруповань. Вони є основою фітоценотичної різноманітності, структури та функціонування екосистем. Інформація стосовно спільного зростання рослин на певній території, їхня кількісна та якісна характеристика, що зібрана у конкретні геоботанічні описи, є специфічними даними про біорізноманіття.

Актуальність проблеми созологічної характеристики флори Національного природного парку (НПП) «Північне Поділля» обумовлена необхідністю ідентифікації у її складі рідкісних та зникаючих видів. Природоохоронним територіям відводиться головна роль у збереженні раритетних видів рослин та рідкісних рослинних угруповань. Тому виділення раритетної компоненти флори при інвентаризаційних дослідженнях, для збереження та розвитку їх генофонду, є надзвичайно важливою проблемою сталого розвитку суспільства.

Об'єктом дослідження є рослинні угруповання у різних кліматичних і ґрунтово-геологічних умовах їх зростання на території НПП «Північне Поділля».

Мета – обґрунтування алгоритмів створення фітоценотичної бази даних (фітоценотеки) НПП «Північне Поділля», її фактичного наповнення, багатомодульної структури організації та аналіз можливостей автоматизації синтаксономічної діагностики, з використанням евристичного алгоритму. Завдання – розроблення методології формування моделі фітоценотеки у середовищі універсальних систем керування базами даних для созологічної оцінки НПП «Північне Поділля» в контексті міжнародних конвенцій [2].

НПП «Північне Поділля» створено (2010 р.) для збереження цінних природних та історико-культурних комплексів і об'єктів Гологоро-Вороняцького кряжу, розміщеного у середній частині Гологоро-Кременського структурно-ерозійного кряжу на північному уступі Подільської височини [7]. У системі національної екологічної мережі парк є складовою Галицько-Слобожанського екологічного коридору, забезпечує функціонування Північноподільсько-Опільського макроекокоридору регіональної екомережі. Важливе значення парк має для охорони верхів'їв басейну р. Західний Буг. Основним

орогідрографічним елементом НПП є лінія Головного Європейського вододілу, яка розділяє периферійні області стоку Балтійського і Чорного морів. Територія парку має кластерну структуру, що знижує природоохоронну ефективність його функціонування. В кластерах заповідної зони, оточених господарськими територіями, внаслідок постійного антропогенного впливу підвищується загроза зниження біологічного та ландшафтного різноманіття.

Згідно з фізико-географічним районуванням України (Екологічна енциклопедія, 2006), територія парку знаходиться в межах Широколистолісової зони, Західноукраїнського краю, Розтоцько-Опільської горбогірної області та Західноподільської височинної області, з такими фізико-географічними областями і районами: Миколаївсько-Бережанського та Гологірського районів Розтоцько-Опільської височинної області; Вороняцького і Зборівсько-Теребовлянського районів Західноподільської височинної області; Радехівсько-Бродівського і Куликівсько-Бузького районів області Малого Полісся. За геоботанічним районуванням (Національний атлас України, 2007) парк знаходиться в межах Європейської широколистянолісової області, Центральноевропейської провінції, Південнопольсько-Західноподільської підпровінції, Опільсько-Кременецького округу букових, грабово-дубових лісів, справжніх та остепнених лук і лучних степів та евтрофних боліт.

Созологічна оцінка рослинного покриву необхідна для збереження біотичного різноманіття Північного Поділля в контексті сталого розвитку регіону. У рослинному покриві парку переважає лісова рослинність [8]. Найбільші площі займають мезофітні неморально-лісові ценози з домінуванням бука звичайного, дуба звичайного, граба звичайного. Велике созологічне значення у регіоні мають кальцефільні букові ліси. У парку представлені також грабово-дубові ліси, переважно з домінуванням дуба звичайного. Порівняно незначні площі займають ліси сосни звичайної. На дуже обмеженій площі наявний фрагмент соснового деревостану з типом угруповань, характерним для дюн Середньої Європи. Також на території парку представлені фрагменти соснових лісів, які 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. Трапляються у парку гігрофільні ліси вільхи чорної. Є також ліси берези пухнастої.

Лучно-степовий тип рослинності на території парку представлений ценозами з переважанням осоки низької. Угруповання мезофітних лук представлені ценозами двох типів, це ксеро-мезофітні луки і мезофітні лісові луки.

Особливу фітосозологічну цінність мають гігрофільні трав'яні ценози прибережно-водної, болотної та болотно-лучної рослинності. Найбільші за розмірами й найкраще збережені болотні масиви на території парку знаходяться у верхів'ях рр. Західний Буг, Золочівка, Стир. Для верхів'я р. Західний Буг у межах Колтівської улоговини характерні карбонатні болота. Прибережно-водна й водна рослинність представлена лише фрагментарно угрупованнями, які трапляються у старицях Західного Бугу, ставах і меліоративних каналах. У Колтівській улоговині представлена унікальна рослинність незакріплених піщаних дюн.

Флора парку за попередніми даними нараховує близько 1100 видів, які належать до 470 родів, 113 родин, 6 класів та 5 відділів [8]. З цього числа 16 видів є ендеміками різного рангу, близько 240 видів ростуть на межах своїх ареалів, або в локалітетах, відірваних від основного ареалу. На територіях парку росте 82 види судинних рослин, які включені до Червоної книги України (2009 р.). Чотири види судинних рослин включені до Червоного списку Міжнародного союзу охорони природи (МСОП). Чотири види занесені до Європейського Червоного списку. Вісім видів включені до Додатку I Бернської конвенції. Зростання багатьох видів потребує ще підтвердження. Територія парку представлена кількома десятками розрізнених фрагментів. Тому, використання заснованого на базах даних підходу до зберігання просторової інформації созологічного аналізу, необхідне для

формування інформаційної основи обґрунтування природоохоронного влаштування території, шляхом оптимізації функціонального зонування парку.

Сучасні фітоценотеки передбачають наявність оригінальних описів, які вводяться безпосередньо авторами з польових щоденників, а також літературних та архівних даних. Фітоценотичні дані являють собою значний масив інформації. Це геоботанічні описи, екологічні та географічні показники окремих видів, їх таксономічна належність і т. п. Для обробки і впорядкування великої кількості інформації, сьогодні успішно використовуються різноманітні бази даних (БД). Вони різняться своїми завданнями, предметною галуззю і технікою комп'ютерної реалізації. У БД раціонально зберігається великий масив геоботанічної інформації, ефективно здійснюється його поповнення та аналіз.

Високу ефективність демонструють програми, побудовані за модульним принципом, які складаються з окремих самостійних частин, переробка кожної з яких не вимагає переробки всієї системи [9]. Платформою для реалізації модульного принципу створення фітоценотичних баз даних (фітоценотеки) є MS Access. Це достатньо гнучка, популярна і потужна за своїми можливостями оболонка для проектування баз даних. Тому її доцільно використовувати для формування соціологічної бази даних в науково-дослідній роботі НПП «Північне Поділля».

Основною відмінністю пропонованої БД рослинності від подібних існуючих систем є широкий спектр завдань: від простого введення геоботанічних описів і створення вибірки геоботанічних описів за вказаним критерієм до проведення багатопараметричного аналізу синтаксонів. Це забезпечується особливою ідеологією організації БД – багатомодульним принципом. Модуль – це відносно самостійна логічна частина БД, призначена для досягнення певної мети. Модульна організація БД рослинності представлена в табл.1.

Модульна організація БД дозволяє ефективно аналізувати велику кількість даних, шляхом наповнення модулів (табл.1). Цей аналіз може здійснюватися в площині будь-якого параметру чи параметрів. Серед зазначених вище модулів БД основними є модулі географічного, екологічного, біоморфологічного і ценотичного аналізу.

Модуль географічного аналізу ставить за мету визначення міри тяжіння видового складу певного синтаксону чи окремого фітоценозу до тих чи інших географічних регіонів. Можливий експорт і візуалізація даних – у GIS Mapinfo.

Модуль екологічного аналізу ставить за мету проведення фітоіндикаційної оцінки за видовим складом. В основі розрахунків лежить принцип зваженого середнього, де додатками є оцінки видів в екологічних шкалах. Розрахунок можливий за 14 екологічними чинниками. Результатом є фітоценотичні показники, що визначають екологічний центр синтаксону.

Модуль біоморфологічного аналізу ставить за мету встановлення спектра (співвідношення) різних життєвих форм у складі ценофлори. За базову прийнято класифікацію життєвих форм К. Раункієра. При розрахунках встановлюється відносний уміст видів різної життєвої форми, що визначає морфологічну та фізіономічну структуру фітоценозів. Також проводиться аналіз за традиційною системою класифікації життєвих форм І. Г. Серебрякова та за типом підземної сфери.

Таблиця 1. Модульна організація БД рослинності

Модульна організація БД рослинності							
Модуль «Фітоценоз»				Модуль «Екологія»			
1	Номер опису	5	Деревостан	1	Термоклімат	6	Вологість
2	Автор опису	6	Травостій	2	Кріорежим	7	Мінеральний азот
3	Дата опису	7	Видовий склад	3	Омброрежим	8	Освітленість
4	Літературні джерела.			4	Засоленість	9	Гумус
				5	Кислотність		

Модуль «Синтаксономія»				Модуль «Геодата»			
1	Валідна назва синтаксону	4	Діагностичні види синтаксону	1	Зональне районування	3	Ботаніко-географічні райони України
2	Синоніми	5	Константні види синтаксон	2	Флористичне районування.		
3	Ієрархічна підпорядкованість синтаксону	6	Характерні види синтаксону				
Модуль «Біоморфа»				Модуль «Таксономія»			
1	Типи біоморф за К. Раункієром	3	Класифікація розеткових біоморф.	1	Валідна назва виду	3	Автор виду
2	Типи біоморф за І. Г. Серебряковим			2	Синонімічні назви виду	4	Таксономічна належність
Модуль «Антропоекологія»							
1	Види Червоної книги України	3	Види Європейського Червоного списку	5	Урбанofільність		
2	Види Бернської конвенції	4	Гемеробність видів.	6	Фітоценотип		

Модуль синтаксономічної ідентифікації ставить за мету визначення фітоценотичного спектра, котрий являє співвідношення в складі певного фітоценозу флористичних елементів різних синтаксонів. Наявність у БД інформації щодо діагностичних видів різних синтаксонів дозволяє проводити розрахунок фітоценотичного спектра автоматично і таким чином визначати ті синтаксони, до яких у найбільшій мірі тяжіє той чи інший фітоценоз.

Структура БД являє систему таблиць, у кожній з яких зберігаються дані окремого модуля фітоценотеки. Між собою таблиці зв'язані в реляційну структуру за спільними полями. Поля з обох боків реляційного зв'язку індексуються для прискорення пошуку і виконання запитів до БД. Коло цих запитів надзвичайно широке за призначенням, від створення вибірки описів за певним критерієм (автором, датою опису, наявністю певного виду у фітоценозі), до фітоіндикаційних розрахунків та автоматичної класифікації. Основними індексними полями є номер опису для модуля «Фітоценоз» і назва виду для таксономічного модуля.

Важливою задачею, яка ставиться при створенні подібних інтегрованих систем збереження й аналізу даних – це задача класифікації рослинності і синтаксономічної ідентифікації. Для вирішення цих задач необхідно щонайменше три складові – модуль «Синтаксономія», модуль «Фітоценоз», модульна підпрограма «Фітоценотичний аналізатор». Наповнення модуля «Синтаксономія» здійснюється з використанням існуючих систем класифікації, що є еталоном для подальших порівнянь. Тут містяться дані про назви синтаксонів та їх ієрархічну підпорядкованість. Наповнення цього модуля враховує існуючі системи класифікацій та доповнюється за результатами класифікації за даними натурних обстежень території. «Фітоценотичний аналізатор» – уся сукупність даних і методів їхнього перетворення, що дозволяє визначити відносну подібність конкретного фітоценозу до існуючих синтаксонів і провести синтаксономічну ідентифікацію. Фітоценотичний аналізатор дозволяє проводити ідентифікацію фітоценозів з невідомою синтаксономічною належністю щодо існуючих синтаксонів, дані про які містяться в модулі «Синтаксономія». Спочатку створюється вибірка геоботанічних описів для аналізу в результаті пошуку і фільтрації даних модуля «Фітоценоз». Еталон для порівняння являє модуль «Синтаксономія». На проміжних етапах роботи підпрограми синтаксономічної ідентифікації

розраховується масив коефіцієнтів флористичного порівняння видового складу фітоценозу та існуючих синтаксонів [9].

Созологічний аналіз рослинного покриву НПП «Північне Поділля», в якому переважає лісова рослинність потребує особливих інформаційних моделей лісів, як об'єктів природно-заповідного фонду. На рисунку 1 представлено подання формалізованого опису предметної області для лісових ділянок здійснене з використанням техніки спеціальних ER-діаграм [10].

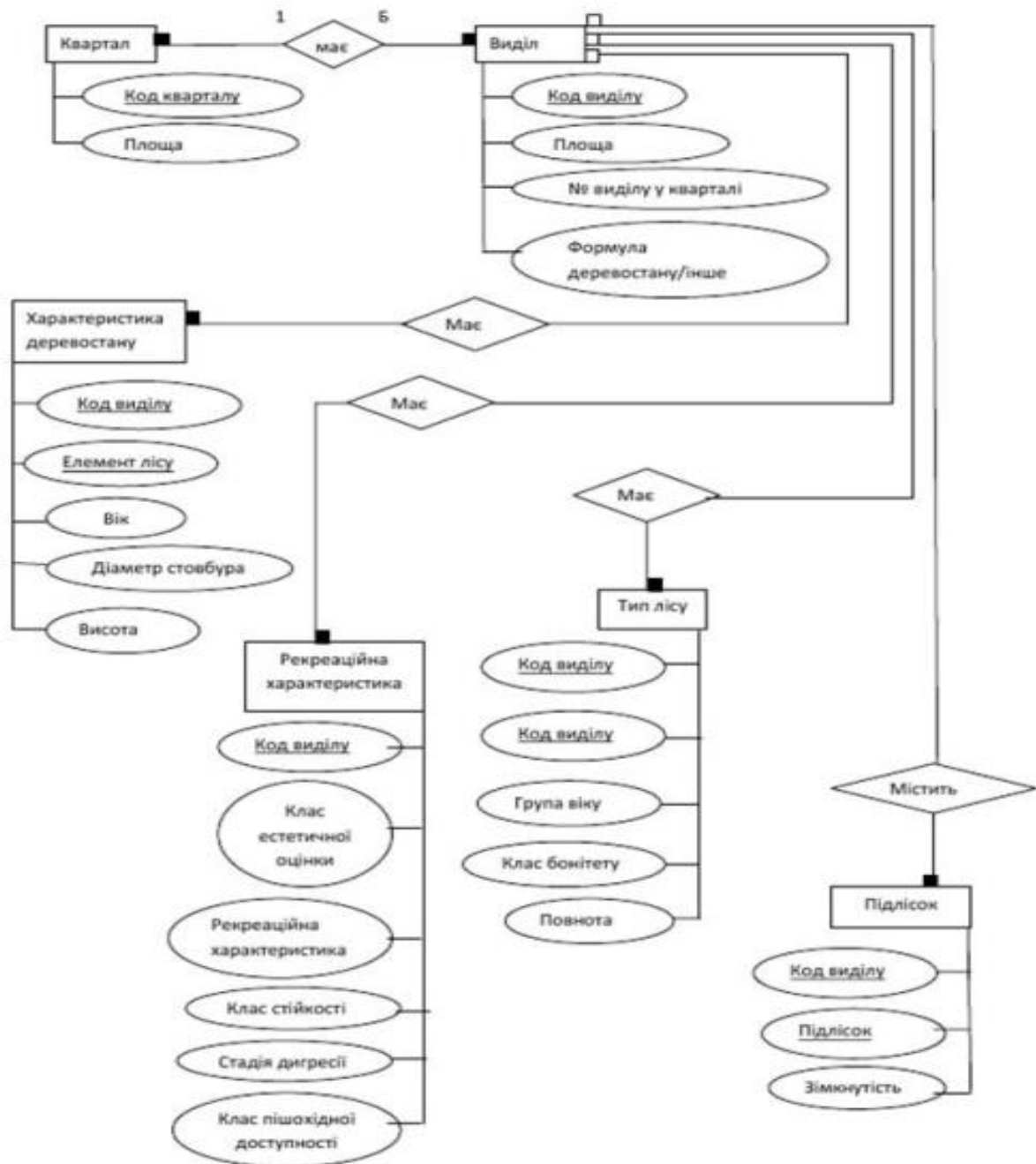


Рисунок 1. ER-модель бази даних лісових екосистем

Виділено (рис.1) додаткові об'єкти-сутності: квартал; виділ; рекреаційна характеристика (естетична оцінка, стадія дигресії, пішохідна доступність, клас стійкості насаджень); підлісок; характеристика деревостану (вік, діаметр стовбура, висота); тип лісу. Розроблення структури баз даних лісових екосистем сприятиме збору, накопиченню, збереженню і систематизації відомостей в єдиній базі геопросторових даних, що забезпечить

комплексний аналіз територій парку. Розробка моделі БД дозволить проводити збирання й накопичення необхідної інформації про рослинність природоохоронної території. Наповнену БД можна підключати до більшості сучасних ГІС, у т.ч. MapInfo, ArcGIS.

Висновки і перспективи подальших досліджень передбачають актуалізацію бази даних з просторовими та атрибутивними характеристиками для соціологічної оцінки територій і об'єктів НПП «Північне Поділля». Введення та накопичення інформації у великих фітосоціологічних базах за уніфікованим флористичним списком є вкрай необхідним. Максимально правильно і чітко введені дані та сформовані на їх основі вибірки, дозволять проводити коректні метааналізи, що на порядок підвищить об'єктивність та точність отриманих результатів.

1. Ємельянова С.М., Куземко А.А. (2017). Національна фітосоціологічна база даних рослинності України (UKRVEG): актуальність створення та проблеми розбудови. *Класифікація рослинності та біотопів України як наукова основа збереження біорізноманіття: матеріали другої науково-теоретичної конференції* (с.24-37). Київ: Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України. <https://www.researchgate.net/publication/323581800>.

2. Mokryi V.I., Arustamyan E.M., & Bondar V.I. (2024). Концептуальна модель соціологічної бази даних біологічного різноманіття НПП "Північне Поділля. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. International Science-Practical Conference, October 23-25, 2024, Lviv, Ukraine*. <https://doi.org/10.36930/conf150.4.14>.

7. НПП «Північне Поділля». <https://park-podillya.com.ua/>.

8. Кагало О.О. (2012). В.А. Онищенко і Т.Л. Андрієнко (Ред). *Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України. Ч.2. Національні природні парки*. (с.381-394). Київ: Фітосоціоцентр.

9. Гончаренко І. В. Модульна організація баз даних для цілей фітоценотичного аналізу (2008). *Екологія та ноосферологія, Т. 19, № 1-2*, 31-44. <https://goo.gl/prurea>.

10. Гальченко Н.П, Козарь В.І. (2019). Структура бази даних для забезпечення геоінформаційного моніторингу земель природно-заповідного фонду. *Екологічна безпека: Вун. 1. (с.32-37)*. [https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2019_1\(27\)/PDF/32_37.pdf](https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2019_1(27)/PDF/32_37.pdf).

ДОСЯГНЕННЯ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

Нестер Анатолій

Хмельницький національний університет

м. Хмельницький, Україна

nesteranatol111@gmail.com

Анотація. У даній роботі досліджено процес екологізації економіки Європейського Союзу як один із пріоритетних напрямів сучасної економічної та екологічної політики. Зростаючі екологічні виклики, зміна клімату, виснаження природних ресурсів та деградація довкілля зумовлюють необхідність трансформації традиційної моделі господарювання у бік сталого розвитку. Проаналізовано основні інституційні та нормативно-правові засади екологічної модернізації економіки ЄС, механізми фінансової підтримки «зеленої» трансформації, а також роль державного регулювання у стимулюванні екологічно відповідального бізнесу. Особлива увага приділяється впливу екологізації на

конкурентоспроможність європейських економік, створення нових «зелених» робочих місць та зростання рівня екологічної свідомості населення. Зроблено висновок, що екологізація економіки ЄС є не лише вимогою часу, а й стратегічною відповіддю на глобальні виклики, яка здатна забезпечити довготривалу економічну стабільність, соціальну справедливість та збереження навколишнього середовища.

Ключові слова: екологізація економіки, Європейський Союз, сталий розвиток, Європейський зелений курс, кліматична політика, циркулярна економіка, зелений інвестиційний план, декарбонізація.

Abstract. This paper examines the process of greening the European Union's economy as one of the priority areas of modern economic and environmental policy. Growing environmental challenges, climate change, depletion of natural resources and environmental degradation necessitate the transformation of the traditional economic model towards sustainable development. The article analyses the main institutional and regulatory framework for the environmental modernisation of the EU economy, mechanisms of financial support for green transformation, and the role of government regulation in stimulating environmentally responsible business. Particular attention is paid to the impact of greening on the competitiveness of European economies, creation of new 'green' jobs and growth of environmental awareness of the population. It is concluded that the greening of the EU economy is not only a requirement of the times, but also a strategic response to global challenges, which can ensure long-term economic stability, social justice and environmental protection.

Keywords: greening of the economy, European Union, sustainable development, European Green Deal, climate policy, circular economy, green investment plan, decarbonisation.

У ХХІ столітті питання екологічної безпеки стало ключовим викликом для глобальної спільноти. Країни Європейського Союзу (ЄС), усвідомлюючи загрози, які несе зміна клімату, деградація природних ресурсів та зростання викидів парникових газів, активно впроваджують стратегії з екологізації економіки. Це – комплексний процес переходу від традиційної, ресурсоемної економіки до моделі "зеленої" економіки, яка базується на принципах сталого розвитку, енергоефективності, циркулярності та зниження екологічного впливу.

Успішна екологізація економіки потребує також активної участі суспільства, бізнесу та наукових установ, а також тісної співпраці між державами-членами ЄС.

Одним з найважливіших питань екологічної безпеки України та країн Європи є декарбонізація енергетики тобто розвиток відновлюваних джерел енергії, відмова від вугілля та атомної енергії. Цей процес передбачає значне скорочення викидів парникових газів, які виникають під час виробництва та споживання енергії, через відмову від традиційних джерел енергії – вугілля, нафти та у ряді країн – атомної енергії, а також масштабне впровадження відновлюваних джерел енергії.

ЄС послідовно інвестує у розвиток таких джерел, як сонячна енергія, вітрова та гідроенергетика, біомаса, біогаз та геотермальна енергія. У 2023 році понад 40% електроенергії в ЄС було вироблено з відновлюваних джерел, і цей показник постійно зростає. Особливо динамічно розвивається вітрова енергетика у Німеччині, Данії, Іспанії та сонячна – у Греції, Італії, Нідерландах.

В Україні станом кінець 2020 року встановлено СЕС загальною номінальною потужністю 6320 МВт без урахування близько 407,9 МВт потужностей, які перебувають на окупованій Росією території, які генерують 1,265 млрд кВт·год електроенергії. Частка СЕС на перший квартал 2021 року у загальній генерації України складає близько 6 %. А враховуючи що в Україні річне надходження сонячного випромінювання перебуває на

одному рівні з країнами, які активно використовують сьогодні сонячні колектори (Швеція, Німеччина, США), то у нас ще є достатньо можливостей для зменшення декарбонізації.

Вугілля – найбільш «брудне» джерело енергії – поступово зникає з енергетичних балансів країн ЄС. Так Німеччина планує повністю відмовитись від вугілля до 2038 року, хоча існують пропозиції пришвидшити цей термін, а Франція, Бельгія, Австрія та Швеція вже закрили свої останні вугільні електростанції. А Європейський інвестиційний банк з 2022 року не фінансує проєкти, пов'язані з викопним паливом.

Ведеться дискусія навколо атомної енергетики тому що ставлення в ЄС до цієї проблематики неоднозначне. Деякі країни, як-от Франція, продовжують активно експлуатувати АЕС і навіть будувати нові, вважаючи атомну енергію "низьковуглецевою". Інші ж країни, як Німеччина, Італія, Австрія, розглядають її як ризиковану з точки зору екології та безпеки й повністю відмовились від неї. Євросоюз у 2022 році включив атомну енергію до таксономії зелених інвестицій за певних умов, що викликало суперечки серед держав-членів.

ЄС планує до 2030 року скоротити викиди парникових газів на щонайменше 55% від рівня 1990 року та до 2050 року стати вуглецево нейтральним континентом. Декарбонізація енергетики – не просто технічне завдання, а фундаментальний компонент зеленої трансформації ЄС. Вона забезпечує як зменшення екологічного навантаження, так і формує нові економічні можливості у сферах ВДЕ, "зелених" технологій, інноваційного виробництва та зайнятості.

В умовах кліматичної кризи та зростаючих екологічних викликів промислова трансформація стала одним із ключових пріоритетів політики Європейського Союзу у рамках Європейського зеленого курсу (European Green Deal). Метою цієї трансформації є перехід від традиційного, ресурсо- та енергоємного виробництва до інноваційної, низьковуглецевої, ресурсоефективної та стійкої промисловості. Чисті технології (clean tech) – це інноваційні технологічні рішення, які дозволяють зменшити викиди CO₂ та інших забруднювачів, знизити споживання води, енергії та сировини, впровадити замкнуті цикли виробництва, використовувати екологічно безпечні матеріали. Через це ЄС активно інвестує у розвиток зеленого водню як майбутньої альтернативи викопному паливу, електрифікації промислових процесів, уловлювання та зберігання вуглецю, роботизації та автоматизації, що дозволяє підвищити ефективність виробництва.

Країни ЄС також підтримують розвиток екодизайну (ecodesign) тобто підхід до створення товарів, який враховує повний життєвий цикл продукту: від виробництва до утилізації. Він дозволяє зменшити використання шкідливих речовин, полегшити ремонт, повторне використання і переробку, зменшити кількість відходів. З 2021 року в ЄС діє оновлена директива з екодизайну, яка поширюється не лише на побутову техніку, а й на промислове обладнання, електроніку та інші товари.

Сталий ланцюг постачання означає, що на всіх етапах — від видобутку сировини до постачання кінцевому споживачу – дотримуються принципи екологічної безпеки, соціальної відповідальності (відсутність дитячої праці, гідні умови праці), прозорості та простежуваності джерел.

ЄС зобов'язує великі компанії запроваджувати ESG-звітування (екологічні, соціальні, управлінські показники) та відповідати стандартам корпоративної відповідальності за сталий розвиток. Крім того, у 2023 році був ухвалений Регламент про екологічні претензії (Green Claims Directive), що забороняє "зелене" маніпулювання (greenwashing) і зобов'язує бізнес доводити свої "зелені" заяви доказами.

Промислова трансформація неможлива без інноваційної екосистеми. ЄС підтримує підприємства через програми Horizon Europe, NextGenerationEU, InvestEU та концепції людиноцентричного, сталого та стійкого виробництва. Промислова трансформація країн Європейського Союзу – це не лише відповідь на екологічні виклики, але й стратегічна інвестиція в економіку майбутнього. Впровадження чистих технологій, екодизайну та сталих

ланцюгів постачання створює передумови для конкурентоспроможної, інноваційної та кліматично нейтральної промисловості, що є основою зеленого майбутнього ЄС.

У традиційній (лінійній) моделі економіки ресурси добуваються, використовуються та утилізуються, часто – у вигляді відходів, які не піддаються подальшій переробці. Такий підхід призводить до надмірного виснаження природних ресурсів, забруднення навколишнього середовища та зростання кількості відходів. У відповідь на ці виклики країни Європейського Союзу впроваджують модель циркулярної економіки, яка базується на максимальному продовженні життєвого циклу ресурсів.

Основні принципи циркулярної економіки можна визначити наступним напрямленнями:

- зменшення відходів – шляхом оптимізації виробничих процесів та використання меншої кількості матеріалів;

- переробка та повторне використання – вторинна сировина стає повноцінним ресурсом у новому виробничому циклі;

- дизайн для циклічності – продукти створюються з урахуванням їх подальшої переробки, ремонту чи розбирання;

- споживання як послуга – перехід від володіння речами до їх оренди, обміну чи спільного використання (наприклад, шерингова економіка);

- відновлення природних систем – зменшення тиску на довкілля та відновлення біорізноманіття.

Європейський Союз розробив план дій для циркулярної економіки (Circular Economy Action Plan) у межах Європейського зеленого курсу, який передбачає встановлення чітких вимог до екодизайну продуктів (розширення дії Ecodesign Directive), розвиток ринку вторинної сировини, заборону одноразових пластиків, стимулювання ремонту, повторного використання та обміну товарів, обов'язкове маркування екологічного сліду товарів, та впровадження розширеної відповідальності виробника тобто – виробники відповідають за утилізацію своїх товарів.

Циркулярна економіка охоплює як побутову, так і промислову сферу. Зокрема, активно розвивається Upcycling – створення нових продуктів з використаних матеріалів, індустріальна симбіоз – коли відходи однієї компанії стають ресурсом для іншої, та біоекономіка – переробка органічних відходів у біогаз, біопластик або добрива.

Як висновок можна стверджувати що циркулярна економіка – це не просто нова модель споживання та виробництва, а фундаментальна зміна підходу до ресурсів, екології та економіки загалом. Країни Європейського Союзу, переходячи до циркулярних моделей, не лише скорочують шкідливий вплив на довкілля, але й створюють нові робочі місця, розвивають інноваційні галузі та зменшують залежність від імпортової сировини.

Успішне впровадження зеленої трансформації потребує значних фінансових ресурсів. Екологічна модернізація енергетики, транспорту, промисловості, інфраструктури, сільського господарства та інновацій – усе це вимагає інвестицій на сотні мільярдів євро щороку. Саме тому зелене фінансування стало ключовим інструментом для формування сталого та кліматично нейтрального майбутнього Європейського Союзу.

Зелене фінансування – це процес мобілізації фінансових ресурсів (інвестицій, кредитів, грантів, облігацій) для реалізації проектів, що зменшують викиди парникових газів, сприяють адаптації до змін клімату, розвивають відновлювану енергетику, захищають біорізноманіття та екосистеми, підтримують циркулярну економіку, скорочують забруднення повітря, ґрунту та води.

У 2020 році ЄС представив стратегію зі сталого фінансування, яка передбачає створення єдиного фінансового середовища, що сприятиме «зеленим» інвестиціям. Основні інструменти цієї політики:

- таксономія ЄС це офіційна система класифікації економічної діяльності, яка вважається екологічно сталою. Вона допомагає інвесторам визначити, які проекти справді

«зелені», запобігає greenwashing'у (нечесному просуванню як «екологічних» неекологічних проєктів), сприяє прозорості фінансового ринку;

-зелені облігації (Green Bonds) це інструмент, за допомогою якого уряди, банки чи компанії залучають кошти для реалізації екопроєктів. ЄС запровадив стандарт EU Green Bond Standard, який уніфікує вимоги до таких облігацій;

-програми фінансування, серед яких InvestEU – підтримка екологічних проєктів через Європейський інвестиційний банк (EIB), NextGenerationEU – масштабний відновлювальний фонд, з якого щонайменше 37% коштів мають бути спрямовані на "зелені" цілі та механізм справедливого переходу (Just Transition Mechanism) – допомога регіонам, що найбільше залежать від викопного палива.

Зелений мандат для Європейського інвестиційного банку (EIB) став офіційно "кліматичним банком ЄС", який до 2025 року має спрямовувати половину всіх інвестицій на кліматичні проєкти. За оцінками Єврокомісії, для досягнення кліматичних цілей до 2030 року ЄС щороку потребує щонайменше 350 млрд євро "зелених" інвестицій. У 2022 році обсяг зелених облігацій у ЄС перевищив 300 млрд євро. Більше 60% європейських інвесторів враховують екологічні фактори при ухваленні фінансових рішень.

Як висновок можна зафіксувати, що зелене фінансування є ключовим елементом переходу Європейського Союзу до сталого та кліматично нейтрального майбутнього. Воно не лише забезпечує необхідні кошти для реалізації екологічних проєктів, а й формує нову фінансову культуру, в якій економічна вигода поєднується з відповідальністю перед планетою. Розбудова ефективної системи зеленого фінансування – це стратегічна інвестиція у здорове довкілля, стабільну економіку та добробут майбутніх поколінь.

Транспорт є одним з найбільших джерел парникових газів у Європейському Союзі: він генерує близько 25% усіх викидів CO₂, з яких лівова частка припадає на дорожній транспорт. У зв'язку з цим розвиток екологічної мобільності став стратегічним напрямком зеленої трансформації в межах Європейського зеленого курсу.

Екологічна мобільність передбачає перехід від залежності від викопного палива до стійких, безпечних і доступних видів транспорту, що зменшують вплив на довкілля та покращують якість життя громадян. Одним із пріоритетів є модернізація та популяризація громадського транспорту, зокрема:

- електрифікація автобусів та трамваїв;
- використання водневого палива;
- інтеграція квиткових систем (один квиток – кілька видів транспорту);
- розвиток приміського та регіонального залізничного транспорту.

Німеччина запровадила 49-євровий щомісячний квиток на весь громадський транспорт країни, щоб зменшити використання приватних авто.

Франція активно інвестує в нові трамвайні маршрути та інфраструктуру для електробусів.

Перехід до електромобільності – ще один ключовий компонент екологічної мобільності. У межах стратегії "Fit for 55" ЄС ухвалив рішення заборонити продаж нових автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння з 2035 року, розвивати мережу зарядних станцій (ЄС ставить за мету мати зарядну станцію кожні 60 км на основних автомагістралях), стимулювати купівлю електромобілів через гранти та податкові пільги.

Нідерланди, Швеція та Норвегія (не член ЄС, але в зоні ЄЕЗ) демонструють найвищі показники електромобілізації: у деяких регіонах частка електрокарів серед нових авто перевищує 80%.

Розвиток екологічної мобільності у країнах ЄС – це не просто транспортна модернізація, а перехід до нової якості життя, зниження забруднення повітря, зменшення заторів і викидів CO₂, підвищення безпеки та зручності пересування. Стійкий транспорт – це фундамент зеленого та комфортного майбутнього міст і громад у Європейському Союзі. Україна намагається не відставати від світових трендів та планує вже через 10 років значною мірою перейти на екологічні види транспорту, зокрема громадського

Розвиток велосипедного транспорту – це не лише екологічно, а й економічно вигідне рішення для міст. Створюються велошосе, виділені смуги, велопарковки, запроваджуються державні програми субсидування купівлі велосипедів та електровелосипедів, популяризуються системи bike-sharing (велосипеди в оренду). Копенгаген (Данія) та Амстердам (Нідерланди) вважаються світовими лідерами велосипедної мобільності – понад 40% мешканців щодня пересуваються містом на велосипеді.

Завдяки своїй індивідуальній культурі та мальовничим ландшафтам Україна має потенціал для розвитку велосипедної інфраструктури. Активний відпочинок за допомогою їзди на велосипеді стає все більш поширеним за останні два десятиліття, знаменуючи значний прогрес у підході країни до цього екологічно чистого виду транспорту.

Які ж досягнення та задачі ставить перед собою Європейський Союз? Сільське господарство з низьким рівнем викидів – підтримка біорізноманіття, органічного землеробства та сталих методів виробництва в контексті формування зеленого майбутнього країн Європейського Союзу». Це сільське господарство з низьким рівнем викидів: підтримка біорізноманіття, органічного землеробства та сталих методів виробництва. Сільське господарство є не лише джерелом продовольства, але й одним із важливих чинників зміни клімату. За даними Єврокомісії, понад 10% загальних викидів парникових газів у ЄС припадає на аграрний сектор, головним чином через метан (CH₄) та закис азоту (N₂O). Водночас, сільське господарство має великий потенціал у скороченні викидів, відновленні екосистем та підтримці біорізноманіття.

Органічне сільське господарство – це форма агровиробництва, що виключає використання хімічних пестицидів, синтетичних добрив, ГМО та антибіотиків. Воно сприяє поліпшенню здоров'я ґрунтів і води, зменшенню навантаження на екосистеми, підвищенню якості продуктів харчування. ЄС прагне досягти до 2030 року принаймні 25% сільськогосподарських угідь під органічним виробництвом.

Стале сільське господарство сприяє збереженню біологічного різноманіття, зокрема відновлення природних середовищ існування (луки, болота, ліси), використання агролісівництва (поєднання лісу і полів), створення "екологічних коридорів" для тварин і комах, заборона шкідливих хімікатів, небезпечних для запилювачів (бджіл, метеликів тощо).

Програма «Farm to Fork» (Від ферми до виделки) – один із ключових елементів Європейського зеленого курсу – передбачає перехід до здорової та екологічної продовольчої системи. Сільське господарство ЄС активно впроваджує інноваційні та низьковуглецеві технології, що передбачає прецизійне землеробство – використання дронів, сенсорів, GPS для оптимізації обробки полів, використання агроекології – поєднання сільськогосподарських практик з екологічними знаннями, ротацію культур, зменшення розорювання, збереження вуглецю в ґрунтах, біогазові установки, які переробляють сільськогосподарські відходи в енергію.

У багатьох європейських країнах діють програми субсидій та грантів для екологічних фермерів, які дотримуються сталих стандартів.

Тваринництво – основне джерело метану. Метан – ще один важливий парниковий газ, що утримує тепло в атмосфері. Однак його впливу на екологію і клімат приділяється набагато менше уваги, ніж іншим вуглецевим викидам. При цьому потенціал глобального потепління від метану в 30 разів більший, ніж у діоксиду вуглецю. ЄС працює над раціонами годівлі, що зменшують викиди метану, зменшенням інтенсивності виробництва, розвитком альтернативних білків (рослинних, клітинних), зменшенням харчових відходів і скороченням споживання м'яса на душу населення.

Спільна аграрна політика ЄС (CAP) реформується з акцентом на екологію. Фермери отримують фінансування лише при дотриманні екологічних умов. Еко-схеми (Eco-schemes) – фінансова підтримка за впровадження сталих практик. Стратегія Biodiversity 2030 включає сільське господарство як ключовий фактор збереження природи.

Сільське господарство з низьким рівнем викидів – це не просто шлях до екологічної модернізації агросектору, а основа продовольчої безпеки, кліматичної стабільності та

збереження природи. Європейський Союз, інвестуючи в сталу агрополітику, демонструє, що прогресивне сільське господарство може бути водночас ефективним, конкурентним та екологічно безпечним.

Варто відзначити, що всі держави – члени несуть відповідальність за реалізацію ЄС природоохоронного законодавства. Формування політики Європейського Союзу у сфері охорони довкілля здійснюється поетапно шляхом прийняття так званих Програм дій з довкілля, які хоча і носять рекомендаційний характер, але завдяки встановленню чітких напрямків, цілей і принципів екологічної політики Європейського Співтовариства, разом з їх детальним описом і графіком реалізації сприяють розвитку та імплементації екологічного законодавства Європейського Союзу. Питаннями охорони довкілля на рівні ЄС займаються: Європейська Комісія, Європейський Парламент, Європейська Рада і Європейська Агенція з довкілля (ЄАЗД), що була утворена у 1990 році.

Основи для співпраці між Україною і Європейським Союзом у сфері охорони довкілля було закладено ще в 1994 р. відповідно до Угоди про партнерство і співробітництво між ЄС та його державами-членами і Україною.

В базовому законі українського екологічного законодавства, Законі України «Про охорону навколишнього природного середовища», екологізація матеріального виробництва на основі комплексності рішень у питаннях охорони навколишнього природного середовища, використання та відтворення відновлюваних природних ресурсів, широкого впровадження новітніх технологій, визначається як один з основних принципів охорони навколишнього природного середовища.

1. Волинець Л. М. (2021). Лібералізація міжнародних автомобільних перевезень – новий імпульс розвитку транспортної галузі. Економіка транспортного комплексу. 37. 161–176.

2. Кашканов А. А., Пальчевський О. В. (2022). Проблеми функціонування транспортних систем великих міст України в сучасних умовах. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.. №1(18). 97-102.

3. Бондаренко І., Прокопенко В., Шененко М., Шульга К. (2021) Огляд іноземних велосипедних стратегій. Київ.

4. Сментина Н.В., Доброва Н.В. (2017). Модернізація міського електротранспорту на шляху забезпечення збалансованого розвитку міста. Економіка. Фінанси. Право. 5(2). 55-60

5. Яновицька А. В. (2013). Правове регулювання міжнародних вантажних перевезень автомобільним транспортом. Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ. 3. 106–116.

6. Марич Х. (2023). Екологізація сільського господарства: правовий аспект. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Юридичні науки» 4 (40).

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНТЕГРОВАНОМУ ЕКОЛОГІЧНОМУ ПРОСТОРИ СУЧАСНОГО МІСТА

Олексюк Ганна

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

ganna.v.oleksuk@lpnu.ua

Попадинець Назарій

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

nazarii.m.popadynets@lpnu.ua

Лагун Андрій

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

andrii.e.lahun@lpnu.ua

Abstract. This paper examines the issues of environmental monitoring in modern cities, highlighting the synergistic effects and interconnections between various aspects of urban life, including construction, waste generated by enterprises and individuals, transportation, unauthorized electricity-generating devices installed by businesses, heat production stations, and the reduction of flora and fauna that impacts oxygen consumption. All of these factors are relevant to the development of a carbon-free economy worldwide, the implementation of which can improve the global environmental situation and reduce greenhouse gas emissions. Comprehensive monitoring of anthropogenic impacts using modern information technologies can enhance human well-being by improving environmental protection. The calculation of an integrated urban environmental quality index enables a quantitative assessment of the impact of pollutants on human health.

Keywords: environmental monitoring, carbon-free economy, construction, waste, electricity, transport, synergistic impact, integrated assessment index.

Анотація. В роботі розглядаються проблеми екологічного моніторингу сучасного міста, з яких виділяють прояви синергетичного впливу та взаємозв'язки між різними напрямками життєдіяльності міста, а саме будівництва, відходів діяльності підприємств та людей, транспорту, пристроїв генерації електроенергії, зокрема встановлених підприємствами без наявних дозволів, станцій для виробництва тепла, зменшення флори і фауни, які впливають на споживання кисню. Всі перераховані чинники мають відношення до формування безвуглецевої економіки у світі, реалізація якої дозволяє покращити екологічну ситуацію на планеті і зменшити викиди парникових газів. Комплексний моніторинг антропогенного впливу суспільства за допомогою сучасних інформаційних технологій дозволить покращити життя людей через вдосконалення захисту оточуючого середовища. Обчислення сформованого показника якості оточуючого середовища в місті дозволяє кількісно оцінити вплив забруднюючих речовин на здоров'я людей.

Ключові слова: екологічний моніторинг, безвуглецева економіка, будівництво, відходи, електроенергія, транспорт, синергетичний вплив, показник комплексної оцінки.

Для дослідження елементів інтегрованого екологічного простору сучасного міста розглянемо його як закритий простір з позиції адміністративно-територіального устрою, просторового планування на географічній поверхні землі, управління та майна. Так, відповідно до законодавства, усі населені пункти України мають чітко встановлені межі у параметрах, визначених на основі просторового планування територій за затвердженої містобудівної документації. Отже, межі територіальних громад, у тому числі їх центрів, міст, селищ, сіл, формують складну закриту систему із відповідною кількістю елементів, які взаємодіють, інтегруються між собою у процесі функціонування та розвитку територіальної

громади. Складними називають системи, у яких функціонування елементів настільки взаємозумовлене і пов'язане, що їхнє окреме дослідження є просто неможливим, або спричинить до невірних висновків [1, с. 24]. Саме екологічні компоненти складної системи територіальної громади потребують комплексного і системного підходу, так як перебувають у природному взаємозв'язку, рухаються часто поза волею людини.

За дослідженнями та твердженням окремих вчених, для територіальної громади, окремих населених пунктів, можливо застосувати нову натуральну одиницю, у якій тісно переплетені природне середовище, об'єднаний соціально-економічний, демографічний, технічний, політичний та інші блоки. Такою одиницею була прийнята *геосоціосистема* як територіально відмежована система, у якій функціонально поєднуються екологічний, соціальний та економічний блоки, де відбуваються всі організовані й реалізовані людьми екологічні, соціально-економічні, демографічні, інформаційні й інші процеси [2, с. 24].

До засад закритості системи населеного пункту і територіальної громади можна також віднести організацію управління і місцевого самоврядування, наявність належного (тільки громаді) майна, земельних ресурсів, інфраструктурних об'єктів, фінансів тощо.

Як відомо, взаємовідношення, взаємозв'язки та інтеграція потенціалів об'єктів та суб'єктів, що відбувається у закритій системі між її елементами, формують відповідний синергетичний ефект, який є носієм як сталого розвитку, так і носієм стримування або негативного впливу. Таким чином, при дослідженні синергетичної системи управління екологічними протиріччями на рівні територіальної громади, необхідна організація взаємозв'язків і антогонізмів, так як на початковій стадії її формування існують зовнішні загрози соціально-економічним інтересам [3, с. 258].

Основою для забезпечення сталого розвитку територій для майбутніх поколінь є, насамперед, сприятлива екологічна ситуація, збереження навколишнього природного середовища, відновлення територій після втручання (видобування корисних копалин, забудови і ін.). Сталий розвиток розглядається як складна комплексна та глобальна проблема екологічного, соціального та економічного плану, вирішення якої спрямоване на задоволення потреб людини сьогодні без загрози можливості задовольнити власні потреби у майбутньому [2, с. 18].

Істотне посилення або послаблення потенціалу закритої системи сучасного міста спричиняють як різко позитивні, так і різко негативні наслідки, які формуються в екологічному просторі територій. Найважливішим є розуміння того, що попри закриту систему сучасного міста, екологічний простір є відкритим, із складним визначенням меж впливу, поширення на інші території. Екологічний простір складається із великої кількості взаємовпливів, які є наслідком інтегрованих зв'язків елементів системи територіальних одиниць, що посилюється на основі природних екологічних чинників: повітря, вода, ґрунти, флора, фауна тощо. Важливим у цьому процесі є *розроблення та використання інформаційних технологій, як інструменту визначення загального синергетичного ефекту вертикальних та горизонтальних інтегрованих структур у закритій системі сучасного міста*. Застосовуючи синергетичний підхід до проблем управління екологічними протиріччями, створюється модель, головним направленням якої є досягнення постійного контролю та регулятивного впливу на зовнішні і внутрішні чинники, що створюють умови потенційної екологічної конфліктності [3, с. 258].

Синергія, як сумуючий ефект, коли при взаємодії двох або більше факторів їх дія суттєво переважає ефект впливу окремого, особливо в екологічній сфері, в першу чергу стосується здоров'я, розвитку, якості і рівня життя людини. Отже, для дослідження розвитку будь-якої території необхідно визначити окремі види та напрями діяльності, які так чи інакше створюють синергетичний вплив, тобто інтегруючись, створюють додатковий ефект. Всі види синергії тісно пов'язані між собою, здійснюючи вплив один на одного, підсилюючи або пом'якшуючи наслідки. Узагальнюючий комбінований ефект впливу факторів, які формують окремий синергетичний ефект інтегрованої структури екологічного простору сучасного міста, однозначно *не дорівнює сумі цих ефектів*.

Закрита система сучасного великого міста є великою та складною, у якій переважає *неадитивність*, а саме, ефективність діяльності елементів змінюється у просторі і часі і не завжди дорівнює алгебраїчній сумі самих ефектів та загального синергетичного впливу. У неадитивних системах відбувається принципова незвідність її властивостей до загальної суми властивостей її складників. Дуже часто підсумковим результатом є не тільки теперішня активність та взаємодія, а й наслідки минулого цієї системи, стратегічне бачення розвитку, вплив зовнішнього середовища інших систем. Тому екологічний простір сучасного міста необхідно розглядати як неадитивні (емерджентні) відношення, що властиві для розвитку складних відкритих систем. Це означає, що закритий простір міста взаємодіє із значною кількістю відкритих просторів: інвестиційний, ринковий (економічний), соціальний, науковий, екологічний і інші, об'єкти та суб'єкти яких так чи інакше знаходяться на його території.

Оцінка впливу щодо загального синергетичного ефекту інтегрованого екологічного простору сучасного міста, як системи неадитивного характеру, має формуватись на основі підходів комп'ютерного екологічного моніторингу та сучасних інформаційних технологій. Для більш детального розуміння інтегрованого екологічного простору сучасного міста розглянемо окремі напрями діяльності елементів складної системи. На теперішній час, у зв'язку із агресією росії у 2022 році та введенням воєнного стану в Україні, створені нові негативні виклики для країни, які, будучи безпеково, соціально, економічно направлені, створюють негативний синергетичний ефект в екологічному просторі будь-якого міста країни.

Інтегрований екологічний простір сучасного міста формується під впливом значної кількості складових, у тому числі внаслідок процесів урбанізації, зростання ролі великих міст для розвитку територій, людини, посилюючи негативний вплив окремих процесів. Разом із цим, всі види синергії внаслідок життєдіяльності людей пов'язані між собою, здійснюється вплив один на одного як у негативному так і позитивному плані. Зростання економіки, рівня життя, загального соціально-економічного, інтелектуального розвитку підтримує позитивну синергію як на локальних територіях, так і в цілому. При цьому, негативний вплив на екосистему з боку цивілізації може проявлятися/проявляється через проведення антропогенного забруднення, винищення або виснаження природних благ, збідніння флори, фауни тощо.

Екосистема сучасного міста формується під впливом та на основі ряду складових видів діяльності і функціонування суб'єктів, що розташовані на його території, які можна виділити у окремі напрями, що взаємо проникають, тобто інтегруються, переплітаючи негативний та позитивний синергетичний вплив. Важливим завданням при цьому є ефективно зважування позитивних переваг та негативних недоліків взаємного синергетичного впливу, зокрема в закритих системах міста й поширення його у відкриті простори: географічний (екологічний), ринковий, демографічний та інші. Розглянемо наступні напрями життєдіяльності міста, у яких найбільше концентровано прояви синергетичного впливу та взаємозв'язки між ними саме в екологічному просторі сучасного міста (рис. 1).

Будівництво. (S1) Спорудження об'єктів житлового фонду, різного виду інфраструктури для проживання і використання мешканцями міста, ведення господарської діяльності, отримання інших послуг, необхідних для життя, здоров'я, розвитку тощо, можна віднести до ключових напрямів, що забезпечує існування міста в принципі. Зокрема, акцентуємо увагу на житловому будівництві, яке помітно активізувалось на безпечних територіях країни у великих і середніх містах, у тому числі в період воєнного стану. Такі міста стали на інтенсивний та екстенсивний шлях забудови житлом власних територій. Потреба щодо зростання житлового будівництва також безпосередньо пов'язана із необхідністю забезпечення житлом внутрішньо-переміщених осіб тощо. Для прикладу, розглянемо тенденцію введення в експлуатацію житла у Львівській області, переважна частина якого будується у місті Львові. За даними обласного управління статистики у 2020

році прийнято в експлуатацію 1015,7 тис. кв. метрів житла, у 2021 – 1211,5 тис. кв. метрів, , у 2022 – 720,6 тис. кв. м, у 2023 – 769,5 тис. кв. м, у 2024 – 1062,4 тис. кв. м, що на 32 % більше від попереднього року [4]. Разом із цим, особливості воєнного часу обмежують доступ до окремих показників будівництва, особливо це стосується незавершених об’єктів, або тих які в процесі оформлення процедури здачі в експлуатацію. Зовнішнє спостереження простору міста показує про значні обсяги реального спорудження особливо житла. За деякими дослідженнями сфера будівництва відповідає за близько 50 % кліматичних змін у природному середовищі, 40 % енерговитрат та 50 % відходів сміттєзвалищ поруч із забрудненням повітря, води, шуму, руйнування природних багатств.

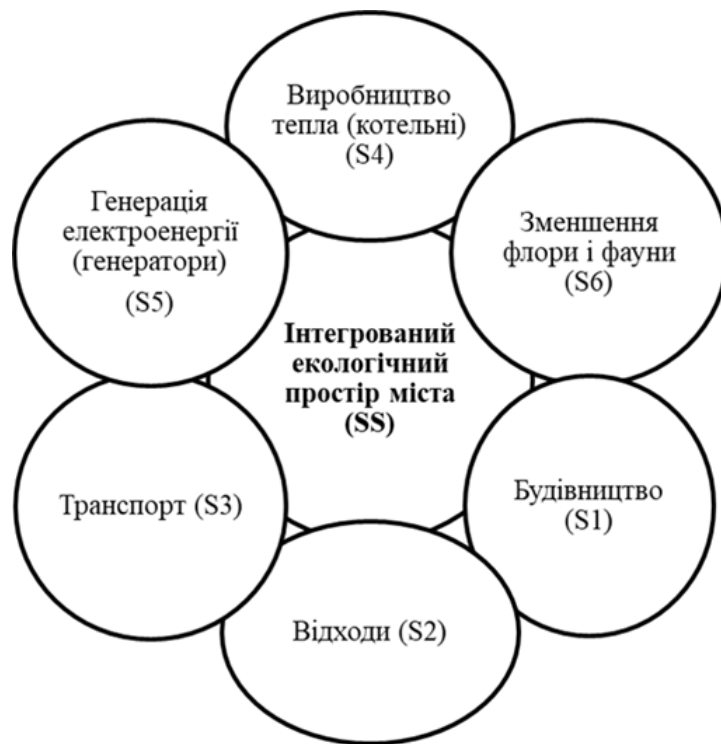


Рис. 1. Синергія екологічних проблем сучасного міста

Різно збільшуючи поверховість житлових будинків, інвестори, забудовники, а згодом власники такого житла отримують житлові площі на відносно меншій території земельних ділянок. Тобто інтенсивний шлях житлового будівництва формує позитивну соціально-економічну синергію.

Екстенсивний шлях розвитку сучасних міст – це будівництво, зокрема і житлове на околицях, забудовуючи додаткові земельні ділянки, які раніше використовувались як земельні угіддя для вирощування аграрної продукції, садівництва, були звичайними природними луками з низкою рослинністю. Такі земельні ділянки, їх природа і фауна слугували потенціалом для поширення впливу позитивної екологічної синергії.

Разом із цим досліджуємо і прояви негативної синергії в екологічному просторі сучасних міст, пов’язаних із активністю житлового та іншого будівництва. У першу чергу, це щільність забудови, заміщення прибудинкових територій, коли зменшується природний покрив землі і здатність поглинання вологи, що спричиняє підтоплення доріг, будинків. Ліквідація зелених насаджень на територіях забудови не завжди відновлюється, для росту дерев необхідно тривалий час, коли зелені насадження зможуть частково нейтралізувати забруднення повітря.

Попри це, використання окремих будівельних матеріалів, утеплення будинків, що під дією високих та низьких температур можуть виділяти шкідливі речовини у повітря, поширенню у відкритий екологічний простір яких сприяє і сама висотність будинків.

Відповідно до методів екологічної оцінки ефективності будівель за стандартами BREEAM встановлюється ряд критеріїв й вимог до будівництва, а саме: боротьба із забрудненням навколишнього середовища, контроль за використанням холодоагентів та їх витоком, контроль дощових потоків, парникових газів, забруднення природних водотоків від стоків будівлі тощо [5].

Відходи. (S2) Зростання темпів житлового будівництва безпосередньо призводить до збільшення чисельності населення міста, покращення демографічної ситуації, що поширює вплив позитивної синергії на основі активізації зайнятості мешканців, підвищення їх рівня і якості життя. Разом із цим відбувається вплив негативної синергії в екологічному просторі внаслідок збільшення відходів природного життя людини, твердих побутових відходів, відходів технологічного характеру тощо. Збільшується потреба у будівництві об'єктів для очищення стоків, перероблення та утилізації твердих відходів, що на теперішній час потребує додаткових інвестиційних ресурсів. Темпи будівництва природоохоронних об'єктів відстають від наявності відходів, які безперервно у часі і просторі продукуються людиною та її діяльністю і потребують відповідного поводження. Як наслідок, відбувається забруднення довкілля, ґрунтів стихійними сміттєзвалищами, відвалами, скиданням нечистот у водойми, річки тощо. На сьогодні переважна більшість сміттєзвалищ в Україні не відповідає екологічним вимогам, чверть із яких є перевантаженими, що містить джерела небезпек розповсюдження інфекційних хвороб, забруднення підземних вод, утворення газу, самозаймання.

Транспорт. (S3) Паралельно, із збільшенням чисельності населення міста, підвищенням рівня його добробуту, доходів, розвитку, потреб комфорту, задоволення темпів мобільності, зростає і кількість автомобільного транспорту на вулицях міст, паркування у дворах, прибудинкових територіях. Цей процес частково можна віднести до позитивного синергетичного впливу стосовно соціально-економічної складової якості життя людини.

Разом із цим, на сьогодні сучасні міста України і їх мешканці різко відчують негативний екологічний та соціальний вплив від наявності й пересування, паркування великої кількості автомобілів в усіх можливих установлених і неустановлених місцях. Транспортний потенціал населення збільшується прискореними темпами, у той час як міста не спроможні створити необхідну кількість місць для паркування під час активної мобільності мешканців, а також місць для власників щодо постійного знаходження авто. Назріла проблема є причиною систематичних заторів на вулицях, а це в свою чергу різко збільшує забруднюючі викиди в атмосферу у екологічному просторі міста. Викиди транспортних засобів, що рухаються по дорозі здійснюються у вигляді дрібних часточок з поверхні дороги і продуктів зносу покриття та шин, створюється транспортний шум, концентруються відпрацьовані гази.

Територіальні громади розглядають проблеми транспортної складової як одну із стратегічних цілей розвитку, формують окремі проєкти, програми, здійснюють закупівлю міського електротранспорту. При просторовому планування території населених пунктів все частіше передбачаються окремі земельні ділянки під будівництво транспортних шляхів, перехоплюючих паркінгів тощо. Разом із цим, одним із завдань залишається системний моніторинг повітря, безпека мобільності автотранспорту для мешканців в місцях найбільшого скупчення автотранспорту, обробка і систематизація екологічних показників за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. Вирішення транспортної проблеми сучасного міста потребує комплексного підходу, а саме врегулювання транспортних потоків через удосконалення напрямів їх руху в існуючій вуличній мережі, побудови доріг понад крайні межі чи за межею населеного пункту, спорудження багаторівневих паркінгів тощо, що потребує значних інвестицій, матеріально-технічних ресурсів та тривалого часу реалізації. Перелічені напрями сприятимуть охороні навколишнього природного середовища, зменшуватиметься негативний синергетичний вплив на здоров'я людей.

Виробництво тепла. (S4) Забезпечення теплом житлового сектору міста та нежитлових виробничих і комерційних приміщень від існуючих теплових об'єктів

(котелень), як газових, так і тих які використовують твердопаливні технології, залишається найбільш поширеним. Відбувається викид шкідливих речовин в атмосферу внаслідок згоряння палива, що потребує встановлення обладнання й ефективних технологічних процесів для вловлювання і очищення цих викидів. Як правило, підприємства теплоенергетики не функціонують без наявності очисних комплексів. Попри це, одним із завдань моніторингу чистоти викидів, повноти очищення, окремо вивчається результат якості внаслідок тривалого використання обладнання, застарілих технологій тощо.

Альтернативні джерела електроенергії. (S5) Повномасштабне вторгнення російських військ на територію України, руйнування об'єктів енергетичної інфраструктури різних рівнів генерації, передавання електроенергії спричинило її дефіцит, вимушене припинення електропостачання для споживачів. Особливо відчутно негативна синергія вплинула на функціонування бізнесу, який частково зупиняє свою роботу, або змушений встановлювати окремі генераційні установки локального характеру (електрогенератори), що працюють на дизельному паливі.

Електроенергія, вироблена електрогенератором у визначеному місці, є значно дорожчою, що впливає на фінансовий результат бізнесу. Попри це, підприємці активно інвестують у придбання цього обладнання, встановлюють його й використовують під час припинення живлення від загальних державних мереж. Місця розташування електрогенераторів не регулюються екологічним законодавством, місцевими екологічними нормами, а тому часто відбувається скупчення їх у найбільш людних місцях, центрах міста, де активно працюють заклади торгівлі, харчування, відпочинку, розваг тощо. Викиди в атмосферу шкідливих речовин внаслідок роботи електрогенератора є надзвичайно інтенсивними, шкідливими, не очищуються, що додатково посилює негативний синергетичний вплив щодо забруднення довкілля сучасного міста.

Робота генераторів та їх негативний синергетичний вплив на природне середовище міста піддається складному екологічному моніторингу, так як використовується генеруюче обладнання різних виробників, потужності, технологічної складової, довільне встановлення у різних місцях. На теперішній час до завдань комп'ютерного моніторингу екологічного середовища міста додається ще один інтегрований напрям – генерація електроенергії за допомогою відкритих генераторів.

Флора і фауна. (S6) Потенціал флори та фауни сучасних міст переважно представляється і формується у парках, скверах, на вільних від забудови земельних ділянках, газонах тощо. Характерною ознакою сучасного міста в Україні є саме боротьба мешканців, громадськості за збереження парків, зелених насаджень, створення нових зелених зон, місць де можуть гніздитися птахи, дрібні представники фауни. Оцінка впливу на навколишнє природне середовище внаслідок зменшення природних ресурсів зелених насаджень, трав'яного покриву і наслідків цього процесу у сучасних містах повинна відбуватись разом із іншими напрямами, так як неодмінно інтегрується у екологічний простір.

Перелічені напрями функціонування територій є практично типовими, мають місце в усіх сучасних містах, разом із цим кожна територія є неповторною за своїми особливостями, тому дослідження екологічного простору повинно доповнюватись впливом діяльності різних промислових об'єктів, рекреаційних зон, особливостями клімату, рельєфу тощо.

Приведені напрями синергетичного впливу на екологічний простір вказують на їх активну інтеграцію, у першу чергу навколо людини, мешканців міста, що свідчить про їх переплетення, невіддільність, взаємопроникнення та посилення дії і створення так званої взаємної синергії.

Посилена, збагачена синергія екологічних проблем (SS) сучасного міста потребує нових наукових досліджень, використання новітніх технологій щодо встановлення показників впливу на здоров'я, життя населення, саме комплексного і системного підходу щодо встановлення зв'язків і аспектів інтегрованого впливу. За допомогою прогресивних ІТ-технологій повинні бути знайдені механізми, способи, інструменти, програми саме

комплексної оцінки стану довкілля, і на її основі запропоновані шляхи вирішення, збалансування позитивних і негативних впливів діяльності людини на екологію.

Для комплексної оцінки екологічних проблем сучасного міста потрібно враховувати вплив всіх названих вище екологічних параметрів на екологічну безпеку міста і сформувати узагальнене кількісне значення показника синергії екологічних проблем. Таке значення буде залежати від багатьох параметрів впливу, які визначаються місце розташуванням, часом доби, погодними умовами, наявністю різних сусідніх об'єктів впливу, біорізноманіттям та іншими засобами.

Узагальнене значення показника можна обчислювати, враховуючи ймовірність появи гранично небезпечних значень параметрів (позначимо p_i), якими будуть характеризуватися вплив на кліматичні зміни, наявність сміттєзвалищ, додаткові енергозатрати для галузі будівництва, наявність відходів через життя людини, твердих побутових відходів і відходів технологічного характеру при збільшенні кількості населення у місті, шкідливі викиди в атмосферу через транспорт, особливо в місцях найбільшого скупчення автотранспорту, заторах на шляхах, викид шкідливих речовин в атмосферу після згоряння палива для виробництва тепла, враховуючи вловлювання і очищення цих викидів, викиди в атмосферу шкідливих речовин внаслідок роботи встановлених у довільних місцях міста електрогенераторів як альтернативних джерел електроенергії, а також параметри забруднень повітря через вплив на навколишнє природне середовище флори і фауни в містах, пов'язаний із зменшенням природних ресурсів зелених насаджень, трав'яного покриву.

Всі наведені показники можна охарактеризувати параметрами (позначимо Inf_i), які будуть визначати їх вплив на екологічну безпеку міста від найменш небезпечного значення (вплив шкідливих забруднень для отриманих числових значень на здоров'я населення відсутній або незначний) до найбільш небезпечних (вплив забруднень визначається критичними значеннями за гранично допустимою шкалою і негативно впливає на здоров'я людей). Значення впливу показників задаємо числами в діапазоні від 1 до 5, що буде відповідати величинам «дуже слабкий», «слабкий», «середній», «значний» і «дуже значний». Зрозуміло, що кожне із значень буде визначатися набором числових величин, кожна з яких визначається стандартами стосовно рівня забруднень.

Загальний показник комплексної оцінки екологічних проблем сучасного міста становить:

$$SS = \sum_{i=1}^6 S_i * Inf_i * p_i$$

де $S_i = \{0, 1\}$ – коефіцієнт, що визначає наявність «1» чи відсутність «0» конкретного синергетичного показника (будівництво, відходи, транспорт, виробництво тепла, альтернативні джерела електроенергії, флора і фауна) для розрахунку екологічної ситуації в місті залежно від вибраної частини території міста.

Максимальне значення показника комплексної оцінки екологічних проблем міста може становити 30, що буде визначатися максимальним впливом всіх шести синергетичних показників на екологічну ситуацію.

Для комплексної оцінки екологічної безпеки міста можна використати web-додатки або мобільні додатки, які будуть використовувати оптимізаційні математичні моделі, що дозволяють спрогнозувати загрози негативного впливу забруднюючих факторів на здоров'я населення. Як приклад, такі інформаційні дослідження небезпечних ситуацій можна здійснювати за допомогою алгоритмів нечіткої логіки.

1. Вовк, В. М., & Дрогомирецька, З. Б. (2002). *Основи системного аналізу: навчальний посібник*. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.

2. Голубець, М. А., Гнатів, П. С., та ін. (2007). *Концептуальні засади сталого розвитку гірського регіону*. Львів: Поллі.
3. Прокопенко, О. В., & Петрушенко, М. М. (2013). Системно-синергетичний підхід управління екологічними протиріччями на територіальному рівні. *Маркетинг і менеджмент інновацій*, (1), 254–264.
4. Головне управління статистики у Львівській області (2025). URL: <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/>
5. Гоменюк, Д. В. (2024). Розвиток будівництва та його вплив на екологію в умовах воєнного стану. У *Інноваційна професійна освіта. Професійна освіта в умовах сталого розвитку суспільства: монографія* (с. 631–641). https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/743504/1/Monografia_2024_IPO-632-642.pdf

ІНСТРУМЕНТИ ФІНАНСУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ВІЙНИ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ МІСЦЕВОГО САМОВРЯДУВАННЯ

Садура Оксана
Національний університет «Львівська політехніка»
м. Львів, Україна
e-mail: oksana.b.sadura@lpnu.ua

Анотація. У дослідженні вказано на сучасні виклики забезпечення екологічної безпеки в умовах воєнного стану та обґрунтовано необхідність активізації фінансових механізмів на рівні місцевих громад. Проаналізовано вітчизняний і міжнародний досвід та запропоновано комплекс інструментів для фінансування екологічних заходів. Зокрема, зроблено акцент на муніципальних облігаціях, "зелених" облігаціях, створенні прозорих місцевих фондів екологічного спрямування, пільговому кредитуванню бізнесу в екологічній сфері, а також залученні грантів і міжнародної технічної допомоги. Особливу увагу приділено розвитку проєктів з відновлюваної енергетики та формуванню нормативно-правової бази, адаптованої до умов війни. Запропоновані підходи спрямовані на формування дієвої системи фінансування екологічної безпеки в післявоєнний період і посилення ролі місцевого самоврядування у забезпеченні сталого розвитку.

Abstract. The study points out the current challenges of ensuring environmental security in martial law and justifies the need to activate financial mechanisms at the level of local communities. Domestic and international experience is analyzed and a set of instruments for financing environmental measures is proposed. In particular, the emphasis is on municipal "green" bonds, the creation of transparent local environmental funds, preferential lending to businesses in the environmental sector, as well as attracting grants and international technical assistance. Particular attention is paid to the development of renewable energy projects and the formation of a regulatory framework adapted to war conditions. The proposed approaches are aimed at forming an effective system of financing environmental security in the post-war period and strengthening the role of local government in ensuring sustainable development.

Ключові слова: фінансові інструменти, екологічна безпека, органи місцевого самоврядування, кредити, облігації, капіталовкладення.

Key words: financial instruments, environmental safety, local governments, loans, bonds, investments.

Російська військова агресія проти України призвела до безпрецедентного руйнування не лише житлової та критичної інфраструктури, а й спричинила глибоку дестабілізацію екологічної ситуації в державі. Значні викиди забруднювальних речовин, що перевищили 105 млн тонн, масштабне забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосфери, а також деградація екосистем створили гостру потребу у фінансово забезпечених заходах з ліквідації наслідків екологічної шкоди.

Особливої актуальності набуває проблема забезпечення екологічної безпеки на місцевому рівні, оскільки саме органи місцевого самоврядування першими зіштовхуються з наслідками воєнних руйнувань та екологічних катастроф. Водночас доступ до фінансових ресурсів для подолання екологічної кризи залишається обмеженим.

У цих умовах критично важливими є розробка і впровадження інструментів фінансування екологічної безпеки — як бюджетних (субвенції, цільові фонди, екологічні податки), так і позабюджетних (гранти міжнародних організацій, публічно-приватне партнерство, зелена фінансова інфраструктура). Місцеві бюджети потребують гнучких механізмів перерозподілу коштів, а також нормативної підтримки для забезпечення реагування на екологічні виклики в умовах війни та післявоєнної відбудови.

Особливе занепокоєння викликає деградація систем централізованого водовідведення та водоочистки. Руйнація цих систем спричинила суттєве підвищення концентрацій важких металів (цинк, мідь, хром, свинець, кадмій) та інших токсичних речовин у відкритих водоймах, що унеможлиблює забезпечення значної частини населення якісною питною водою.

Крім того, складна ситуація в галузі атомної енергетики, зокрема через окупацію Запорізької атомної електростанції, а також знищення елементів критичної енергетичної інфраструктури значно посилюють ризики екологічної небезпеки, у тому числі транскордонного характеру.

За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, сумарна шкода, завдана навколишньому природному середовищу внаслідок збройної агресії, станом на середину 2024 року перевищує 2,4 трлн гривень. Понад 300 тис. км² території країни потребує проведення протимінного обстеження та розмінування.

У контексті протидії зазначених викликів особливої уваги набуває впровадження постійного моніторингу стану довкілля, із фокусом на зміни, зумовлені бойовими діями, а також розробка та реалізація оперативних і стратегічних заходів щодо мінімізації екологічних ризиків — як у воєнний, так і в післявоєнний періоди.

Катастрофічні масштаби руйнувань, погіршення стану основних природних компонентів, а також надзвичайна вартість необхідних відновлювальних заходів обумовлюють необхідність перегляду чинної методики оцінки екологічних збитків в Україні з урахуванням нових реалій і загроз.

Недостатня розвиненість інституційної та нормативної бази, а також обмежений доступ до фінансування на місцевому рівні значно обмежують можливості для реалізації екологічних проєктів. В умовах дефіциту фінансових ресурсів муніципалітети, місцеві бізнеси та громади стикаються з проблемою недофінансування важливих екологічних ініціатив, таких як очищення водних ресурсів, управління відходами, відновлення зелених зон та розвиток енергоефективних технологій. Відтак, фінансово-кредитні інструменти можуть бути ефективним засобом для подолання цих проблем, адже вони дозволяють мобілізувати капітал для реалізації важливих екологічних проєктів, таких як модернізація комунальних служб, будівництво водогонів та каналізаційних мереж, а також розвиток інфраструктури, що знижує навантаження на довкілля.

Важливим елементом цього процесу є використання облігацій місцевих позик, які виступають як боргові фінансові інструменти, що дозволяють залучати необхідні кошти для реалізації інфраструктурних проєктів, у тому числі і екологічних. Важливою умовою для успішного залучення фінансування є розробка відповідної нормативної бази та забезпечення

прозорості у використанні коштів, що дозволяє мінімізувати ризики для інвесторів. Відповідно до норм чинного законодавства України, облігації внутрішніх місцевих позик класифікуються як боргові фінансові інструменти, що фіксують кредитні зобов'язання емітента перед інвесторами. Вони передбачають юридично закріплений обов'язок емітента, або ж іншої сторони, яка випускає неемісійний борговий інструмент, здійснити в певний строк виплати, передати матеріальні активи або надати послуги, а також дотримуватися інших прав та обов'язків власника облігацій та забезпечувальних осіб [1]. Таким чином, при виборі форми запозичення через випуск облігацій місцевих позик, доцільно додатково враховувати нормативні акти та рішення Національної комісії з цінних паперів та фондового ринку, які регламентують діяльність на ринку цінних паперів [2].

Основними напрямками соціально-економічного розвитку регіонів та міст, які фінансуються за рахунок коштів від муніципальних облігаційних позик, є: освіта, транспорт, комунальне господарство та охорона навколишнього середовища (фінансування водогінних, каналізаційних служб та енергосистем); соціальне забезпечення (фінансування будівництва шкіл); розвиток промисловості; будівництво автодоріг, мостів, туристичної інфраструктури та об'єктів сфери послуг.

Впродовж 2021 року, незважаючи на розширені фінансові інструменти для органів місцевого самоврядування щодо залучення позикового капіталу, лише Київська міська рада скористалася можливістю випуску муніципальних облігацій. Було проведено три емісії цінних паперів через АТ «Фондова біржа ПФТС» на загальну суму 1,1 млрд грн. Зокрема, серія «М» випущена на 300 млн грн зі строком обігу 3 роки, серія «N» — на 400 млн грн зі строком 4 роки, і серія «O» — на 400 млн грн з обігом 5 років. Організаторами випуску виступили Укрексімбанк, Укргазбанк та Ощадбанк. Номінальна вартість однієї облігації становила 10 тис. грн, а купонна ставка була встановлена на плаваючому рівні, що дорівнювала обліковій ставці Національного банку України плюс 5% річних [3].

З 2022 року і до сьогодні повністю відсутні пропозиції облігацій місцевих позик з боку будь-яких емітентів. Це викликано глибокою кризовою ситуацією, спричиненою повномасштабною військовою агресією РФ. Суттєве скорочення надходжень до бюджетів усіх рівнів, зростання видаткового тиску та високі ризики для інвесторів через невизначеність ситуації в економічній, соціальній і політичній сферах України створили несприятливі умови для залучення капіталу через ринок облігацій.

Крім того, для забезпечення екологічної безпеки у часи війни, зростає значення міжнародного співробітництва. Наприкінці 2022 року було підписано угоду про співпрацю між Національним депозитарієм України та Центральним депозитарієм Польщі з метою встановлення кореспондентських відносин для здійснення операцій типу «Поставка цінних паперів без оплати» [4]. Ця ініціатива відкриває нові можливості для залучення міжнародних інвестицій у проекти, спрямовані на поліпшення екологічної ситуації в Україні, забезпечує можливість проведення транскордонних переказів облігацій місцевих позик, емітованих українськими муніципалітетами, з їхнім обліком у Національному депозитарії України відповідно до європейських стандартів CSDR. Це важливий крок для інтеграції українських фінансових інструментів у міжнародний ринок капіталів та сприяння розвитку фінансової автономії місцевих органів влади.

Важливим фінансово-кредитним інструментом фінансування місцевого економічного розвитку є кредитування як банківське так і міжнародних фінансових організацій. Кредитна підтримка є важливим інструментом для безперебійного функціонування та розвитку регіонів. Запровадження урядом пільгового кредитування «Доступні кредити 5-7-9» дозволило суб'єктам господарювання отримати необхідні фінансові ресурси для існування [5]. Така державна підтримка суб'єктам підприємництва надається шляхом здешевлення вартості кредитів, в тому числі і суб'єктам господарювання комунального сектору економіки. За час дії воєнного стану (станом на 30.09.2024) в Україні видано 61 789 кредитів на 243,6 млрд грн та 17 647 кредитів на 66,3 млрд грн від початку року [6]. Аналізуючи дані цифри, зазначимо, що впровадження регіональних програм кредитування малого і

середнього бізнесу (МСБ) є важливим кроком для розвитку місцевої економіки та екологізації навколишнього середовища. Такі програми сприяють створенню робочих місць та підвищенню податкових надходжень. Однак, їх ефективність залежить від наявності достатніх фінансових ресурсів на місцевому рівні та доступу до них підприємців.

Посиленої державної підтримки вимагає і забезпечення енергетичної стійкості промисловості України в умовах систематичного знищення об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, що здійснюється РФ. Пріоритетним завданням енергетичної політики в цьому контексті має стати гарантоване енергозабезпечення як побутових споживачів, так і виробничого сектора. Особливу увагу слід приділити розвитку альтернативних джерел енергії, які наразі використовуються недостатньо або взагалі залишаються невикористаними.

Україна володіє значним потенціалом для виробництва та впровадження біологічних видів палива завдяки наявності різноманітної сировинної бази, її доступності та відносно низькому рівню негативного впливу на довкілля. Згідно з даними за 2020 рік, енергія з біопалива та відходів становила 74,6 % у структурі виробництва енергії з відновлюваних джерел, а її частка в загальному постачанні первинної енергії склала 4,9 % (4 243 тис. т н.е.) [7]. Впродовж 2010–2020 років цей показник зріс на 3,8 відсоткових пункти, що свідчить про поступову динаміку розвитку сегмента.

З огляду на це, доцільним є формування цілісної державної політики підтримки ініціатив у сферах виробництва біопалива, розвитку екологічного енергетичного машинобудування та поширення використання альтернативних видів палива. На сьогодні виробники біопаливної продукції (зокрема, пелет і брикетів) мають можливість отримати державну допомогу в межах таких програм, як «Робота» (ініціатива «Новий рівень») та «Доступні кредити 5–7–9 %», орієнтованих на переробні підприємства.

Організація нового бізнес-напряму у сфері виробництва пелет і брикетів потребує капіталовкладень у розмірі 18–20 млн грн, при цьому лівова частка витрат (близько 12,5 млн грн) припадає на закупівлю технологічного обладнання. Проте держава передбачає механізми грантової або кредитної підтримки для таких інвестицій, що розглядається як ще один фінансовий інструмент екологічної безпеки країни. На українському ринку представлений достатньо широкий спектр вітчизняного обладнання (зокрема, компаніями «Артмаш», «Брикетуючі технології», «ІСК Group», «Фора-Захід», «Ферокс» тощо), що створює підґрунтя для запровадження додаткових стимулів. Зокрема, доцільно розглянути можливість зниження компенсаційної відсоткової ставки у межах програми «Доступні кредити 5–7–9 %» для підприємств, які віддають перевагу вітчизняним виробникам обладнання. Також варто ініціювати перегляд параметрів співфінансування у програмі «Новий рівень» у бік підвищення частки державної участі у фінансуванні проєктів, що спрямовані на розвиток відновлюваної енергетики.

Ініціативи зі встановлення котелень, що працюють на альтернативних видах палива, зокрема біопаливі, розглядаються як перспективний напрям розвитку енергетичного сектору в контексті залучення пільгового фінансування. З 1 січня 2024 року в Україні функціонує акціонерне товариство «Фонд декарбонізації України», основним завданням якого є фінансова підтримка проєктів, спрямованих на розвиток відновлюваних джерел енергії, впровадження альтернативних видів палива та реалізацію заходів із мінімізації викидів парникових газів. Станом на грудень 2024 року Фондом було профінансовано реалізацію 30 енергоефективних проєктів.

Пріоритетними для кредитування визнаються проєкти, у структурі яких частка використання обладнання національного виробництва перевищує 70 %. За такої умови передбачене зниження кредитної ставки з 9 % до 7 %, що створює додаткові стимули для підтримки вітчизняного промислового потенціалу та зниження енергетичної залежності.

У сфері житлового господарства заходи з енергоефективності також підтримуються на державному рівні. Зокрема, у 2010–2021 роках реалізовувалась Державна цільова економічна програма з енергоефективності та розвитку виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива [8]. В межах програми акцент

було зроблено на стимулювання впровадження індивідуальних та колективних систем теплопостачання, зокрема твердопаливних котлів, включно з пелетними.

Наступним інструментом фінансування екологічної безпеки, який заслуговує на увагу, є «зелені» облігації—боргові цінні папери, кошти від розміщення яких спрямовуються виключно на фінансування екологічно орієнтованих проєктів. Їх використання на муніципальному рівні в Україні відкриває нові можливості для вирішення локальних екологічних проблем. Залучення коштів через випуск зелених облігацій дозволяє громадам реалізовувати проєкти з очищення водойм, рекультивації забруднених територій, модернізації систем водовідведення, озеленення міського простору та впровадження енергоефективних технологій у комунальному господарстві. Важливо, що такий механізм передбачає цільове, прозоре використання коштів, що підвищує довіру як з боку населення, так і з боку міжнародних донорів та інвесторів.

Зокрема, у листопаді 2021 року НЕК «Укренерго» залучила фінансування в розмірі 825 млн доларів США шляхом випуску «зелених» облігацій сталого розвитку на Лондонській фондовій біржі строком на 5 років.

Під час випуску єврооблігацій книга заявок була перепідписана майже втричі, що свідчить про значну зацікавленість міжнародних інвесторів до перших єврооблігацій компанії, заявки на фінансування отримано більш ніж від 100 інвесторів з різних країн. За результатами прайсингу ставка доходності за єврооблігаціями склала 6,875% річних.

Єврооблігації НЕК «Укренерго» є найбільшим випуском єврооблігацій українськими несuverенними емітентами за весь період, а також найбільшим випуском зелених єврооблігацій емітентами з України [9].

Незважаючи на відсутність широкого досвіду у впровадженні зелених облігацій на місцевому рівні в Україні, деякі громади вже виявили зацікавленість у цьому інструменті. Зокрема, міста Київ, Львів та Вінниця у співпраці з міжнародними фінансовими організаціями розпочали роботу над розробкою нормативної та проєктної бази для майбутнього випуску для таких цінних паперів. Саме ці ініціативи мають стати зразком для інших територіальних громад, особливо тих, що зазнали екологічних руйнувань внаслідок бойових дій.

Водночас існують певні бар'єри для повноцінного впровадження цього фінансового інструменту на місцевому рівні. Серед них — відсутність чіткої нормативно-правової бази, нестача кваліфікованих кадрів у громадах, складність розробки екологічно обґрунтованих проєктів із достатнім рівнем підготовки для виходу на ринок капіталу. Крім того, сам ринок зелених облігацій в Україні ще перебуває на стадії формування, що ускладнює емісію таких інструментів органами місцевого самоврядування без належної підтримки держави і міжнародних партнерів.

Окрім цього, важливим інструментом для фінансування екологічних ініціатив на місцевому рівні став краудфандинг. Завдяки краудфандинговим платформам місцеві громади можуть залучати кошти для реалізації не лише для таких екологічно важливих проєктів, як розвиток альтернативних джерел енергії, а й для озеленення територій, очищення водних джерел, та інших ініціатив, що сприяють покращенню екологічної ситуації. Краудфандинг забезпечує підприємцям і місцевим громадам доступ до капіталу, який важко отримати через традиційні джерела фінансування, такі як банки або венчурні капітали, що особливо актуально для малих і середніх підприємств, які часто зіштовхуються з труднощами при отриманні кредитів.

Платформи краудфандингу надають можливість для стартапів і нових бізнесів продемонструвати свої ідеї безпосередньо потенційним інвесторам, сприяючи розвитку підприємницької активності в регіонах, оскільки бізнес-ініціативи отримують підтримку від місцевих жителів, які зацікавлені в розвитку своєї громади. Також допомагає залучати громаду до процесу прийняття рішень, що стосується екологічного розвитку, адже люди стають активними учасниками проєктів, які їх цікавлять, що сприяє формуванню більшої відповідальності за результати і розвиток як місцевого бізнесу, так і навколишнього

середовища. Краудфандинг служить і інструментом для тестування нових продуктів чи послуг на ринку. Перед запуском бізнесу чи проєкту підприємці можуть перевірити реакцію потенційних споживачів та отримати зворотний зв'язок, що дозволяє адаптувати пропозицію відповідно до потреб ринку. Завдяки краудфандингу бізнеси можуть отримувати фінансування не лише через грошові внески, але й через обмін послугами або продуктами, що підвищує гнучкість у виборі форм фінансування. Важливо, що цей інструмент часто використовується для фінансування соціальних проєктів, які мають вагомe значення для розвитку громади, а саме підтримка екологічних ініціатив, проєктів у сфері освіти, культури або охорони здоров'я.

Отже, використання фінансово-кредитних інструментів, краудфандингу та міжнародного співробітництва є важливими кроками для забезпечення безпеки довкілля в умовах війни. Однак для їх ефективного впровадження необхідно покращити законодавчу та нормативну базу, забезпечити доступ до фінансових ресурсів на місцевому рівні, а також сприяти розвитку партнерств між державними, приватними і міжнародними інституціями. Це допоможе створити умови для сталого розвитку регіонів та збереження навколишнього середовища в умовах надзвичайних викликів, з якими зіштовхується Україна сьогодні.

1. Про ринки капіталу та організовані товарні ринки : Закон України від 23.02.2006 р. № 3480-IV. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3480-15#Text> (дата звернення 10.04.2025 р.)

2. Про затвердження Положення про порядок емісії облігацій внутрішніх місцевих позик та їх обігу : рішення Національної комісії з цінних паперів та фондового ринку від 14.06.2018 р. № 391. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0808-18#Text>

3. Як інвестори зможуть заробити на муніципальних облігаціях у 2022 році. *Національна комісія з цінних паперів та фондового ринку : офіційний вебсайт*. 2022. URL : <https://www.nssmc.gov.ua/iak-investory-zmozhut-zarobyty-na-munitsypalnykh-oblihatiakh-u2022-rotsi> (дата звернення 10.04.2025 р.)

4. Громади отримали можливість випускати муніципальні облігації на міжнародних ринках. *Децентралізація влади в Україні : офіційний вебсайт*. 2023. URL : <https://decentralization.ua/news/15969>

5. Агрес О.Г., Марків Г.В., Томашевський Ю.М. Кредитна підтримка сільськогосподарських підприємств в умовах війни. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Економіка АПК*. № 30. Львів. 2023. С. 59-65

6. Єлісєєва, Л., Теслюк, С. Краудфандинг як економічна форма фандрейзингу в умовах інформаційно-мережевої економіки. *Цифрова економіка та економічна безпека*. (1 (01)). 2022. С. 87-91.

7. Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел / Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>

8. Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2021 роки : Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 № 243, зі змінами та доповненнями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF#Text> (дата звернення 10.04.2025 р.)

9. «Зелені» облігації сталого розвитку 2028. Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: https://ua.energy/pro_kompaniyu/dlya-investoriv/yevroobligatsiyi-2026/

ТЕХНОЛОГІЇ СМАРТ-ТУРИЗМУ ЯК ОДИН ІЗ НАПРЯМІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

Сенета Зоряна

*Національний лісотехнічний університет України,
Національний університет «Львівська політехніка»*

м. Львів, Україна

seneta.zoriana@nltu.edu.ua

Сенета Мар'яна

Національний університет «Львівська політехніка»

м. Львів, Україна

mariana.y.seneta@lpnu.ua

Анотація. У сучасних умовах цифрової трансформації в туристичній галузі активно інтегруються інноваційні технології для підвищення якості надання туристичних послуг, удосконалення інфраструктури та покращення взаємодії з туристами. Застосування технологій смарт-туризму сприяє не лише зростанню конкурентоспроможності туристичних дестинацій, а й забезпеченню соціальної інклюзії, екологічної рівноваги та економічного розвитку регіонів. В умовах постпандемічного відновлення, змін клімату та нових викликів у сфері мобільності потреба в ефективному управлінні туристичними потоками та підвищенні якості туристичного досвіду стає особливо актуальною. Таким чином, дослідження застосування технологій смарт-туризму як інструменту модернізації туристичної індустрії є важливим і актуальним як у теоретичному, так і в практичному аспектах.

Ключові слова: смарт-туризм, туристична галузь, віртуальна реальність, доповнена реальність, інноваційні технології, цифровізація, сталий розвиток.

Abstract. In modern conditions of digital transformation, the innovative technologies for increasing the quality of tourist services, improving infrastructure and enhancing interaction with tourists are actively integrated in the tourism industry. The use of smart tourism technologies contributes not only to increasing the competitiveness of tourist destinations, but also to ensuring social inclusion, ecological balance and economic development of the regions. In conditions of post-pandemic recovery, climate change, and new challenges in the field of mobility, the need for effective management of tourist flows and improving the quality of the tourist experience becomes especially actual. Thus, the research of the application of smart tourism technologies as a tool for modernizing the tourism industry is important and relevant both in theoretical and practical aspects.

Keywords: smart tourism, tourism industry, virtual reality, augmented reality, innovative technologies, digitalization, sustainable development.

Вступ

У сучасному світі стрімкий розвиток цифрових технологій став рушійною силою трансформації багатьох галузей економіки. Одним із актуальних рішень є впровадження смарт-систем – інтелектуальних технологічних підходів для забезпечення автоматизації, ефективності та зручності у повсякденному житті. На даний час технології смарт-систем широко використовуються в енергетиці, транспорті, охороні здоров'я, побуті, а також дедалі активніше – у туризмі. В умовах глобалізації, зростання мобільності, зміни поведінки споживачів та високих очікувань туристів виникає потреба у впровадженні інноваційних підходів до ефективної організації туристичної діяльності. Одним із таких напрямів є розвиток смарт-туризму – концепції, що базується на використанні сучасних цифрових технологій для забезпечення сталого, ефективного, інтерактивного та персоналізованого туристичного досвіду.

Сучасна концепція сталого розвитку туризму акцентує увагу на обов'язковості збереження природної і культурної спадщини, охороні біорізноманіття, покращенні

екологічного, соціального і економічного стану регіонів України, які відвідують туристи [1]. Україна володіє значним туристичним потенціалом. Але, водночас, у кожному регіоні існує значний невикористаний людський та малоосвоєний рекреаційний потенціал для розвитку сфери туризму, які можна ефективно використовувати в майбутньому у відпочинково-туристичних цілях. Відповідно до ст. 6 Закону України “Про туризм” туристична галузь в Україні законодавчо визнана одним із пріоритетних напрямів розвитку економіки та культури [2]. З розвитком галузі туризму одночасно формуються і нові види відпочинку, які поступово займають свої місця на туристичному ринку [3]. Перспективний розвиток галузі туризму в Україні потребує інноваційних методів організації туристичної діяльності, яка сприятиме сталому розвитку туризму. Одним із таких методів є використання сучасних смарт-технологій у сфері туризму.

У галузі туризму смарт-технології кардинально змінюють підхід до організації подорожей. Завдяки інтелектуальним системам бронювання мандрівники можуть швидко знайти й оплатити найвигідніші варіанти перельотів, готелів та екскурсій. Мобільні додатки з вбудованими картами, рекомендаціями та перекладачами забезпечують туристам легкість орієнтації у новому місті. Смарт-міста пропонують інтерактивні інформаційні стенди, автоматизовані системи громадського транспорту та доступ до цифрових сервісів через QR-коди.

Смарт-туризм поєднує у собі такі компоненти, як великі дані (*Big Data*), інтернет речей (*IoT*), мобільні додатки, штучний інтелект, блокчейн, віртуальна та доповнена реальність, що разом формують нову якість туристичних послуг та управління туристичними потоками. Його застосування дозволяє не лише підвищити конкурентоспроможність DESTINACIЙ але й забезпечити екологічну збалансованість, соціальну інклюзію та економічну сталість у туристичному секторі.

Водночас, незважаючи на активне поширення технологій смарт-туризму у світі, в Україні їхнє впровадження залишається фрагментарним і потребує глибшого наукового осмислення, адаптації до національного законодавства та розвитку відповідної інфраструктури.

Технології віртуальної (*Virtual Reality, VR*) [4] та доповненої реальності (*Augmented Reality, AR*) [5] стають невід’ємною частиною у розвитку сучасної галузі туризму, сприяючи створенню інноваційних продуктів, покращенню клієнтського досвіду та розширенню доступності туристичних послуг. Впровадження VR та AR відкриває нові можливості для розвитку туристичної сфери та задоволення різноманітних потреб мандрівників. Інтеграція віртуальної та доповненої реальності у туристичну галузь сприяє не лише розвитку інноваційних сервісів, а й трансформації усього туристичного досвіду, що відповідає вимогам сучасного цифрового суспільства. Впровадження інноваційних технологій відкриває нові можливості для людей з обмеженими фізичними можливостями, сприяючи розвитку інклюзивного виду туризму. Традиційно подорожі можуть бути обмежені для таких осіб через фізичні бар’єри, нестачу доступної інфраструктури або ризику для здоров’я. У цьому контексті VR та AR виступають інструментами, що допомагають долати ці обмеження.

Метою дослідження є аналіз і систематизація технологій смарт-туризму як інструменту модернізації туристичної галузі та виявлення перспектив застосування цих технологій в контексті сприяння сталого розвитку сфери туризму в Україні.

1. Теоретичні основи та досвід впровадження технологій смарт-туризму у країнах світу

У XXI столітті цифрові технології стали рушієм трансформацій у багатьох сферах економіки, зокрема і в туристичній галузі. Згідно з даними ООН, до 2030 року світом подорожуватиме 1,8 мільярда людей [6]. Щоб задовольнити таку кількість мандрівників, країни розглядають смарт-туризм як один із засобів оптимізації та вдосконалення

туристичної інфраструктури, а також як трансформаційний підхід для розвитку туристичної галузі за допомогою впровадження інноваційних технологій.

Варто зазначити, що поняття «смарт-туризм» набуло значного поширення у країнах Західної Європи лише на початку нового тисячоліття. Під цим терміном починають розуміти цілісний, довготривалий, сталий підхід до планування, розвитку і маркетингу туристичних продуктів і бізнесу. У 2012 р. поняття «смарт-туризм» визнано на рівні Всесвітньої туристичної організації, яка розглядає цей туризм, як чистий, зелений, етичний, що пропонує послуги високої якості на всіх рівнях обслуговування та акцентує увагу на впровадженні інноваційних цифрових технологій у туристичний бізнес [7].

Поняття «смарт» (англ. «*smart*» – розумний) використовується для позначення усіх технологічних, економічних та соціальних процесів та явищ, пов'язаних з застосування таких інновацій як датчики, *Big Data*, нових способів зв'язку та обміну інформацією (наприклад, Інтернет речей, RFID та NFC) тощо [8]. Смарт-туризм – це концепція, що ґрунтується на використанні сучасних технологій для покращення досвіду подорожей та забезпечення більш ефективного управління туристичною індустрією. Цей підхід включає в себе використання різноманітних пристроїв, додатків та інтернет-ресурсів для планування поїздок, бронювання номерів для проживання та транспортних послуг, а також отримання інформації про визначні місця регіонів країни та культурні пам'ятки.

Загалом, розвиток смарт-туризму враховує тенденції до постійного вдосконалення туристичного досвіду, ефективного використання технологій, збереження культурно-історичної та природної спадщини регіонів для майбутніх поколінь [9]. В умовах глобалізації, а також сучасних викликів повномасштабної війни та подальшого повоєнного відновлення туристичної галузі, значення розробки та впровадження інноваційних інформаційних технологій в туризмі стрімко зростає [10].

Еволюція смарт-туризму проходила кілька етапів – від цифровізації (використання інтернету та онлайн-бронювання) до інтелектуалізації (впровадження штучного інтелекту, *big data*, AR/VR). Цей туризм розглядають як один із ключових інструментів формування конкурентоспроможності туристичних регіонів.

Критерії, що відрізняють традиційний туризм від смарт-туризму, подано у табл. 1.

Таблиця 1

Відмінність традиційного туризму від смарт-туризму

Критерій	Традиційний туризм	Смарт-туризм
Спосіб комунікації	Особистий, телефонний	Мобільні застосунки, онлайн-платформи
Планування маршруту	Через туроператора	За допомогою смарт-додатків
Інформування туриста	Паперові буклети, гід	AR/VR, QR-коди, геолокація
Управління потоками	Ручне, статичне	Big Data, аналітика в реальному часі
Рівень персоналізації	Низький	Високий, на основі інтересів та даних

Варто зауважити, що у світі з'являється дедалі більше прикладів інноваційних туристичних напрямів. У табл. 2 наведено приклади застосування технологій смарт-туризму у країнах світу [11, 12].

Приклади застосування технологій смарт-туризму в країнах світу

Місто	Приклади застосування
Ель-Ієрро (Іспанія)	Перший у світі «розумний» острів, який досяг енергетичної самодостатності, а також знизив рівень забруднення завдяки виробленню електроенергії зі сміття або заміні цегли вулканічним каменем у будівельному секторі.
Текіла (мексиканський штат Халіско)	Пропонує безкоштовний Wi-Fi в історичному центрі, має додаток з інформацією про продукти та послуги в цьому районі, а також систему даних, яка в режимі реального часу інформує мандрівників про дорожній рух та комерційну діяльність.
Гетеборг (Швеція)	Запроваджено заходи для забезпечення добробуту майбутніх поколінь. Опубліковано розумну карту, яка заохочує громадян до участі в обміні, спільному використанні або оренді житла у місті. Також існує 3D-модель для проведення громадських консультацій, прогнозування впливу майбутнього розвитку та прийняття обґрунтованих рішень. Варто зауважити, що 60% централізованого опалення міста базується на відходах або переробленому теплі, що робить його одним із відомих європейських міст.
Малага (Іспанія)	Встановлено світлодіодне вуличне освітлення та створено численні кілометри велосипедних доріжок, а також кілька пунктів прокату. Також у парках і садах встановлено розумні системи зрошення для економії води, запроваджено план щодо зменшення забруднення повітря, контролю рівня пилку та зменшення шуму.
Любляна (Словенія)	Приділяє особливу увагу сталому розвитку. 20% території складають природні зони, які охороняються з акцентом на перетворенні деградованих ділянок на громадські простори. Столиця також сприяє закупівлі місцевих продуктів для готелів і ресторанів, створює туристичний веб-сайт з широким спектром контенту та додатків.
Гельсінкі (Фінляндія)	Розроблено інтелектуальну систему громадського транспорту, яка отримала високі оцінки. Зараз розглядається система «Uber boat», а також тестуються автобуси без водіїв. Крім того, визначні пам'ятки міста обслуговують працівників, які володіють багатьма мовами, пропонуючи допомогу відвідувачам. Влада міста також акцентує увагу на електричному транспорті та прагне досягти вуглецевої нейтральності до 2035 року.
Копенгаген (Данія)	Досягла значних успіхів у діджиталізації. Запущено туристичну службу, де туристи можуть побачити все, що пропонує місто, за допомогою рухомих білбордів, робототехніки або віртуальної реальності.
Сінгапур	Приклад цифровізації, оскільки там впроваджено рішення, що сприяють розвитку інноваційних спільнот. Туристи мають додатки, які інформують їх про рівень злочинності в кожному конкретному районі та отримують сповіщення про зниклих безвісти осіб та установи екстреної допомоги або інформацію на основі їхнього геопозиціонування.

Концепція смарт-туризму є комплексним багатогранним явищем, яке містить низку компонентів, що базуються на застосуванні розумних технологій для покращення становища всіх суб'єктів туристичного ринку. Це різновид туризму, в якому постійне і систематичне використання смарт-елементів сприяє створенню додаткової цінності подорожі для туриста [13].

Ключові технологічні компоненти смарт-туризму наведено на рис. 1.



Рис. 1. Компоненти смарт-туризму

Варто також зауважити, що впровадження смарт-технологій у туристичну галузь має значні переваги для розвитку туристичної сфери. Проте на регіональному та державному рівнях виникають певні проблеми, які необхідно також комплексно вирішувати (табл. 3).

Таблиця 3

Переваги та проблеми впровадження смарт-технологій у туристичну галузь

Переваги впровадження	Проблеми впровадження
- Підвищення рівня якості туристичного досвіду завдяки персоналізації. - Оптимізація туристичних потоків і навантаження на інфраструктуру. - Покращення управління та маркетингу туристичних дестинацій. - Посилення безпеки туристів. - Підтримка сталого розвитку регіонів (економічного, соціального, екологічного).	- Обмежене фінансування цифрових проєктів та висока вартість впровадження сучасних інноваційних технологій. - Низький рівень цифрової компетентності працівників туристичної галузі. - Нерівномірний доступ до цифрових ресурсів у великих містах та на сільських територіях. - Можливі проблеми з кібербезпекою та захистом персональних даних туристів. - Необхідність державного правового регулювання та стандартизації цифрових сервісів.

Таким чином, смарт-туризм – це сучасна концепція, яка передбачає використання інформаційно-комунікаційних технологій, цифрових платформ, аналітики даних та інновацій для успішного розвитку туристичної індустрії. Він виступає однією з провідних тенденцій трансформації туристичної галузі, що поєднує інновації з орієнтацією на сталий розвиток. Ефективне впровадження технологій смарт-туризму потребує не лише технічних рішень, а й стратегічного планування на рівні регіонів, якісного кадрового забезпечення та ефективної державної підтримки.

2. Пріоритетні напрями впровадження смарт-технологій у туристичну галузь України

На сьогоднішній день віртуальна реальність знаходиться на новому етапі розвитку. Спочатку вона використовувалася переважно в ігровій індустрії, але зараз, завдяки застосуванню віртуальних окулярів, користувач може відчувати себе на борту літака, у готельному номері, у музеї чи навіть на повноцінному круїзному лайнері, використовуючи інструменти сприйняття (3D, VR), щоб зануритися в атмосферу будь-якого туристичного об'єкту та відчувати його реальність. Доповнена реальність дає туристам можливість не лише бачити те, що доступно звичайному погляду на місці відвідування, а й, завдяки спеціальним пристроям (окуляри та смартфони), подивитися, як цей об'єкт виглядав у минулому (на початковому етапі) [14].

Розвиток віртуальної та доповненої реальності у туристичній галузі є результатом еволюції цифрових технологій, що поєднують інженерні, інформаційні та гуманітарні підходи до створення нових форматів туристичного досвіду. У сучасному світі туризм перестає бути виключно фізичною подорожжю, його доповнюють і трансформують цифрові технології. Ці інструменти стають новою формою взаємодії туристів з культурними, природними та історичними об'єктами різних країн світу.

Значення цифрових технологій набуло значного поширення у період появи COVID-19, який суттєво змінив поведінку туристів. Віртуальні подорожі більше не є рідкісним захопленням – вони набули масового поширення: музеї, національні парки, виставки перейшли в онлайн-формат. Це сприяло інтеграції VR/AR у стратегічне планування галузі. У період війни в Україні VR/AR-технології використовуються для збереження культурної спадщини, створення цифрових реконструкцій зруйнованих пам'яток, просування туристичного іміджу України та розвитку інклюзивного цифрового туризму. Усі ці фактори виступають важливою складовою майбутнього повоєнного відновлення туристичної інфраструктури України.

У контексті війни в Україні сфера туризму зазнала суттєвих змін і втрат, зокрема – через руйнування інфраструктури, обмеження на пересування та загрозу безпеці життя та здоров'ю громадян. У таких умовах технології віртуальної та доповненої реальності стають не лише альтернативними інструментами підтримки туристичної активності, а й засобами збереження культурної спадщини, просування іміджу України за кордоном та підготовки до повоєнного відновлення держави. Їх впровадження може стати фундаментом для відновлення та переосмислення ролі туристичної галузі України у післявоєнний період.

Варто зауважити, що Україна має можливості для впровадження сучасних технологій для розвитку туристичної індустрії. Особливо це набуває актуальності у період воєнного стану адже існують значні обмеження для відвідування певних регіонів і територій. Також, з огляду на безпекову ситуацію, відвідування України іноземними туристами значно скоротилося. Саме тому, для ефективного функціонування та розвитку галузі туризму необхідно впровадити такі важливі заходи:

- цифровізація туристичних сервісів (мобільні гіді; QR-коди на пам'ятках; туристичні чат-боти, які підказують локації, маршрути, графіки роботи);
- використання AR/VR технологій музеями і туристичними компаніями для розширення використання віртуальних турів, AR-гідів і цифрових реконструкцій;
- розвиток смарт-інфраструктури в містах (доступність мережі Internet, навігація, електронні сервіси, туристичні додатки). Такі технології стимулюватимуть розвиток внутрішнього туризму;
- сталий туризм і великі дані. Дані з мобільних додатків, соціальних мереж, онлайн-бронювань можуть допомогти управлінню туристичними потоками, оскільки вони стають у допомозі для кращого розуміння поведінки туристів, допомагають прогнозувати пікові навантаження, оптимізувати маршрути, а також можуть

надавати інформацію в режимі реального часу. Аналітика поведінки туристів дає змогу створювати персоналізовані маршрути та пропозиції.

Поряд з перспективами розвитку, перед галуззю туризму також постають і певні виклики, до яких відносять:

- недостатнє фінансування: смарт-рішення потребують інвестицій і технічної підтримки;
- нерівномірний розвиток регіонів: великі міста рухаються вперед, але сільські або менш туристичні регіони відстають;
- низький рівень цифрової грамотності у частини бізнесу і населення;
- безпекова ситуація спричинена війною знижує в'їзний туризм, але стимулює внутрішній і його цифровізацію.

У сучасній туристичній індустрії технології віртуальної та доповненої реальності відіграють дедалі важливішу роль, створюючи нові можливості для взаємодії з туристичними об'єктами, покращення обслуговування та розширення доступу до культурної спадщини. Їх застосування сприяє підвищенню привабливості туристичних послуг, оптимізації вибору маршрутів для здійснення подорожей та збагаченню туристичного досвіду.

Для успішного розвитку туристичної галузі України необхідні такі складові:

- ефективна державна підтримка, яка включатиме цільові програми впровадження цифровізації сфери туризму;
- створення національної стратегії смарт-туризму;
- тісна співпраця IT-компаній, міст та туристичних операторів;
- залучення грантів Європейського Союзу (європейські проекти часто фінансують смарт-туризм);
- підтримка і впровадження чітких ініціатив у містах;
- розвиток цифрової інфраструктури туристичних дестинацій (безкоштовний Wi-Fi у туристичних зонах; пам'ятки культури з QR-кодами та мультимедійним контентом; цифрові табло та інформаційні стенди);
- стимулювання до навчання та підвищення цифрової компетентності працівників (тренінги для працівників туристичної сфери, гідів, готельєрів; створення онлайн-платформи для самонавчання);
- інновації та стартапи у сфері туризму (запровадження державних та регіональних грантів на розробку цифрових туристичних сервісів; підтримка конкурсів та хакатонів з тематики смарт-туризму);
- забезпечення захисту персональних даних туристів (розробка правових механізмів захисту відповідно до європейських стандартів (GDPR); підвищення безпеки цифрових платформ).

У разі успішної реалізації запропонованих заходів очікуються позитивні результати. Серед них, зокрема: зростання туристичного потоку завдяки зручності та привабливості сервісів; підвищення конкурентоспроможності українських дестинацій; зниження навантаження на туристичну інфраструктуру; покращення управління турпотоками та розширення сезонності туризму; формування іміджу України як інноваційно-орієнтованої туристичної держави.

Технології VR дають змогу здійснювати повноцінні віртуальні подорожі до визначних місць, музеїв, природних заповідників та інших туристичних об'єктів без необхідності фізичної присутності. Це дозволяє людям з обмеженими можливостями отримати пізнавальний і емоційний досвід подорожі у комфортних та безпечних умовах. Особливе значення мають VR-тури, адаптовані з урахуванням потреб різних категорій користувачів (наприклад, з порушенням зору або слуху). Таким чином VR сприяють розвитку інклюзивного туризму, забезпечуючи віртуальний доступ до популярних місць особам з обмеженими можливостями.

AR-технології також сприяють доступності туризму. Вони можуть бути використані як навігаційні засоби, що допомагають людям з обмеженими можливостями орієнтуватися в туристичних локаціях, або як інструменти персоналізованого супроводу, які подають інформацію з урахуванням специфічних потреб (субтитри, аудіо-описи тощо). Через мобільні додатки або AR-окуляри користувачі можуть отримати додаткові дані про об'єкти (історичні факти, візуальні реконструкції), орієнтуватися в просторі та взаємодіяти з цифровим контентом. Технології VR і AR активно використовуються у сфері маркетингу туристичних продуктів, в організації навчання персоналу (через симуляції) та у збереженні нематеріальної культурної спадщини (через 3D-реконструкції зруйнованих пам'яток).

За допомогою технологій віртуальної реальності потенційні клієнти мають можливість здійснювати віртуальні подорожі до відомих та важкодоступних місць, що особливо актуально в умовах обмежень на поїздки. Це сприяє розвитку нової форми туризму, яка не залежить від фізичної присутності. AR-технології надають можливість туристам отримувати додаткову інформацію про об'єкти в реальному часі, що покращує їхній досвід та може стати конкурентною перевагою для туристичних компаній. Створення віртуальних платформ, які відтворюють реальні міста, дозволяє туристам взаємодіяти з гідами та постачальниками послуг без фізичної присутності, що відкриває нові горизонти для просування туристичних напрямків. VR-технології забезпечують доступ до музеїв та культурних пам'яток для широкої аудиторії туристів, включаючи людей з обмеженими можливостями, що сприяє інклюзивності в туризмі.

Історія розвитку VR та AR-технологій у туризмі свідчить про їхню здатність адаптуватися до глобальних викликів та відкривати нові можливості взаємодії з культурними і природними об'єктами. У XXI столітті ці технології виступають не лише як інструменти маркетингу, а і як засоби освіти, інклюзії, збереження національної ідентичності та стратегічного розвитку галузі туризму.

Впровадження технологій смарт-туризму є важливим чинником модернізації туристичної галузі України. За умов державної підтримки, стратегічного планування та співпраці з бізнесом і громадами смарт-технології можуть стати ефективним інструментом підвищення якості туристичного досвіду, сприяння сталому розвитку та інтеграції у світовий туристичний простір.

Висновки

Смарт-туризм – це інтеграційна модель розвитку туризму, яка ґрунтується на використанні цифрових технологій (*Big Data*, *IoT*, *AI*, *AR/VR*, мобільні додатки), що забезпечують більш зручне, безпечне, персоналізоване та ефективне обслуговування туристів, а також підвищують якість управління туристичними потоками.

В Україні смарт-туризм перебуває на етапі свого становлення. Сучасні тенденції впровадження інноваційних технологій у туристичну сферу сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності туристичних дестинацій та створенню позитивного іміджу України на світовому туристичному ринку. Розвиток цифрової інфраструктури дестинацій, мобільних сервісів, *AR/VR*-контенту, цифровий маркетинг, туристична аналітика, підвищення цифрової компетентності кадрів галузі – це ключові напрями для впровадження смарт-туризму в Україні. Ефективна реалізація технологій смарт-туризму сприятиме: модернізації галузі відповідно до європейських стандартів; підвищенню якості туристичних послуг; поліпшенню іміджу дестинацій; збільшенню туристичних потоків; забезпеченню сталого розвитку туризму на регіональному рівні.

Туристичний сектор за умови належного управління є ключовим фактором економічного зростання, зайнятості та соціально-культурного розвитку регіонів України. Використання новітніх цифрових технологій надає туристичному бізнесу значні переваги для покращення інклюзивності, розширення можливостей місцевих громад та ефективного управління ресурсами. Таким чином, смарт-технології стали невід'ємною частиною

сучасного туризму, роблячи подорожі більш безпечними, зручними та інформаційно насиченими. У майбутньому їх роль лише зростатиме, сприяючи створенню більш персоналізованих і екологічно сталих туристичних послуг.

1. Seneta, Z. Y. (2024). Сучасний стан та перспективи сталого розвитку індустрії туризму в Україні. Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. International Science-Practical Conference, October 23-25, 2024, Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.36930/conf150.4.18>
2. Про туризм. Закон України № 324/95-ВР (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/324/95-%D0%B2%D1%80#Text>
3. Seneta, Z., & Seneta, M. (2024). Cluster analysis of the development of rural tourism in Ukraine. Economy and Society, (61). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-122>
4. Yasar, K., & Sheldon, R. (2024, August). What is virtual reality? How it's used and how it will evolve. Informa. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/virtual-reality>
5. Hayes, A. (2025, March 02). Augmented Reality (AR): Definition, Examples, and Uses. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/a/augmented-reality.asp>
6. World Tourism Organization (2011, October). Tourism Towards 2030. Global Overview - Advance edition presented at UNWTO 19th General Assembly, UNWTO, Madrid. <https://doi.org/10.18111/9789284414024>
7. Поступна, О. (2024). Перспективи інформаційних технологій у туризмі та курортно-рекреаційній сфері як важливих складових національної економіки, що забезпечують стійкий розвиток регіонів у період повоєнного відновлення країни. *Теоретичні та прикладні питання державотворення*, 32, 263-272. <https://doi.org/10.35432/tisb322024321983>
8. Кочума, І. Ю., Красномоветь, В. А. (2024). SMART-туризм як екосистема: сутність, складові та значення в забезпеченні сталого розвитку територій. *Сталий розвиток економіки*, 3 (5), 487-495. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-50-73>
9. Добрянська, Н. А., Саркісян, Г. О., Ліганенко, М. Г., Орлова Н. В. (2024). Розвиток SMART-туризму: міжнародні та регіональні аспекти. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 9(2), 255-260. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-44>
10. Кара, О., Міхо, О., Растворова, М. (2024). Стан та перспективи розвитку смарт-туризму: світовий досвід та українські перспективи (на прикладі міста Києва як туристичної дестинації). *Вчені записки Університету "КРОК"*, 1 (73), 127-131. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-73-127-131>
11. Smart Tourism: The Future of the Sector is Technological. (2022, November 15). Innovation and Research. <https://www.plainconcepts.com/smart-tourism/>
12. What is Smart Tourism? (2023, October 14). <https://visaindex.com/blog/what-is-smart-tourism/>
13. Воскресенська, О. Є., & Зінов'єва. І. С. (2020). SMART-туризм: система взаємовідносин в дестинації. *Вісник ХНТУ*, 3 (74), 223-231. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.29>
14. Ратинський, В., Шерстюк, Р., & Малярський, О. (2024). Перспективи використання віртуальної та доповненої реальності для підприємств сфери послуг (на прикладі готельно-туристичного сегменту). *Соціально-економічні проблеми і держава*, 1(30), 169-176. <https://doi.org/10.33108/sepd2024.01.169>

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ТРАСУВАННІ ЕНЕРГОПОТОКІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Слюсарчук Арсен

Відокремлений структурний підрозділ

«Навчально-науковий інститут просторового планування та перспективних технологій
Національного університету “Львівська політехніка”»

м. Львів, Україна

arsenslyusarchuk@gmail.com

Анотація:

У статті розглянуто сучасні ІТ-рішення для моніторингу і скорочення викидів парникових газів (ПГ) в аграрному та енергетичному секторах Європи. Проаналізовано метод Power Flow Tracing (PFT) – трасування потоків потужності як інструмент точного відстеження розподілу потоків електроенергії в енергосистемі. Окремо представлено проект COVERE², що застосовує PFT для збору і верифікації даних про викиди в агропромисловості. Досліджено потенціал використання великих мовних моделей (Large Language Models, LLM) та підходу Retrieval-Augmented Generation (RAG) для покращення збору й аналізу екологічної інформації. Наведено приклади використання LLM+RAG для відстеження викидів та окреслено переваги цих технологій у підвищенні точності і деталізації обліку ПГ. Зроблено висновки про те, що поєднання таких ІТ-технологій здатне суттєво посилити зусилля зі скорочення викидів у згаданих секторах за рахунок кращої прозорості, повноти даних і підтримки ухвалення рішень.

Ключові слова: викиди парникових газів, трасування потоків потужності, агросектор, енергосектор, великі мовні моделі, генерація з доповненим пошуком, екоаналіз.

Keywords: GHG emissions, PFT, agriculture, energy, LLM, RAG, environmental data analysis.

1. Вступ.

Глобальна зміна клімату зумовлює необхідність швидкого й масштабного скорочення викидів парникових газів у всіх секторах економіки [1, 2]. Європейський Союз запровадив амбітні цілі: досягти кліматичної нейтральності до 2050 року та знизити сумарні викиди принаймні на 55% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року. Ці зобов'язання закріплено в Європейському кліматичному законі 2021 року [3]. У свою чергу, Україна, у 2021 році оновила свій Національно визначений внесок (NDC), поставивши за мету 65% скорочення валових викидів до 2030 року від рівня 1990 року та досягнення вуглецевої нейтральності до 2060 року [3,4].

Аграрний та енергетичний сектори є ключовими для виконання цих цілей, адже саме на них припадає значна частка викидів. Так, у 2020 році сільське господарство забезпечувало близько 11% загальних викидів ПГ в ЄС, в основному, через емісію метану (CH₄) у тваринництві та закису азоту (N₂O) від використання добрив [5]. Енергетика залишається найбільшим джерелом – до 75-77% викидів шляхом спалювання палива для виробництва електро- і теплової енергії, транспорту, тощо [6]. Водночас, загальні тренди демонструють певний прогрес: сумарні викиди ЄС знизилися приблизно на третину з 1990 року завдяки політикам енергоефективності та впровадженню відновлюваних джерел [5]. Для енергетичного сектору діє система торгівлі викидами ЄС (EU ETS), що стимулює скорочення викидів на електростанціях і в промисловості ринковими методами.

Аграрний сектор охоплений зобов'язаннями за Регламентом розподілу зусиль (ESR) із національними цілями скорочення викидів ПГ [7]. Проте, досягнення поставлених цілей у цих секторах гальмується низкою проблем. Зокрема, сільське господарство відзначається розпорошеністю джерел викидів (тисячі окремих ферм і полів) та значною часткою негазових ПГ, для яких важко впровадити прості технічні рішення. Це ускладнює швидкий моніторинг і

контроль викидів на рівні господарств. За даними досліджень, агропромислові компанії досі стикаються з браком оперативної, простої і комплексної трасування свого екологічного сліду та низькою якістю доступних даних [8]. Крім того, багато фермерських господарств не мають достатніх інструментів обліку використаної ними енергії та пов'язаних емісій, що ускладнює планування заходів зі скорочення викидів.

В енергетиці основний виклик полягає у декарбонізації засобів постачання енергії при збереженні надійності системи. Масштабне впровадження відновлюваних джерел (сонця, вітру) призводить до більш динамічних потоків електроенергії в мережах, ускладнюючи відстеження походження спожитої електрики. Наявні сертифікаційні схеми, такі як гарантії походження електроенергії (GO) та зелені сертифікати (REC), дозволяють постачальникам позначати «чисту» електрику на папері. Проте, ці інструменти не прив'язані до фізичних потоків в мережі і мають обмежену часову та географічну деталізацію [9]. Компанія може купувати сертифікати від відновлюваних станцій, щоб «обнулити» свої непрямі викиди, тоді як фактично спожита нею електроенергія може генеруватися з викопного палива. Така ситуація розмиває реальну картину вуглецевого сліду. Водночас, посилення нормативних вимог, таких як нова Директива про нефінансову звітність (CSRD) в ЄС, зобов'язує компанії розкривати деталізовані дані про викиди, зокрема щодо непрямих викидів від спожитої енергії. Для відповідності цим вимогам потрібні більш точні, прив'язані до місця і часу, методи моніторингу, ніж традиційний підхід ринку сертифікатів [8,9].

У зв'язку з цим, актуальність застосування інноваційних ІТ-технологій для вирішення окреслених проблем лише зростає. Зокрема, мова йде про методи smart-grid аналізу даних електромереж, які можуть підвищити прозорість електричних потоків і пов'язаних із ними викидів CO₂. Одним з таких методів є Power Flow Tracing (PFT) – трасування потоків потужності в електромережі. В агросекторі та екологічному менеджменті набувають популярності засоби штучного інтелекту на базі великих мовних моделей (LLM) у поєднанні з механізмами пошуку релевантної інформації. Подібні рішення здатні автоматизувати збір розрізнених екологічних даних (звіти, сенсори, супутники) та швидко надавати аналітику на їх основі. У цій статті здійснено огляд двох перспективних напрямів: методики PFT для трасування енергопотоків (і обчислення вуглецевого сліду споживання) та використання LLM-моделей з підходом RAG для покращення моніторингу і управління інформацією про викиди. Спочатку розглянуто принципи роботи, переваги і виклики впровадження PFT, у тому числі на прикладі проекту COVERE² в агропромисловості. Проаналізовано можливості LLM+RAG, наведено приклади застосувань у сфері відстеження викидів та окреслено, як ця технологія може доповнити PFT. Варто зазначити, що дослідження ІТ-рішень для кліматичних цілей стрімко розвивається. На даний момент, існують численні напрацювання щодо застосування штучного інтелекту в енергоефективності, управлінні електромережами, «розумному» землеробстві, тощо [22].

2. Метод Power Flow Tracing для моніторингу викидів електроенергії.

Power Flow Tracing (PFT) – це сукупність методів аналізу електричних мереж, що дозволяють простежити шлях електроенергії від конкретних генеруючих джерел до конкретних точок споживання або ділянок мережі [9]. PFT дає змогу визначити, яка частка потужності потрапила від кожного генератора до кожного споживача. Метод був уперше запропонований у 1990-х роках в контексті задач розподілу витрат на втрати в мережі після лібералізації енергоринку. Зокрема, Бялек (Bialek) розробив алгоритм трасування потоків у мережах для віднесення втрат і використання мережі на окремих виробників та споживачів [10], а група дослідників під керівництвом Кіршена – метод визначення внеску кожного генератора в навантаження та потоки в лініях [11]. Ці праці заклали основу підходу: використовуючи результати розрахунку усталеного режиму електромережі, виділити напрямки руху потужності від кожного генератора через вузли мережі пропорційно до їхніх часток. У наступні роки PFT-алгоритми розвивалися та удосконалювалися. Зокрема, з'явилися методи трасування комплексної потужності для урахування циркуляцій реактивної

складової, рекурсивні алгоритми обчислення «вуглецевих потоків» у енергосистемах та моделі, що враховують гібридні ринки та нові елементи, наприклад, зарядку електромобілів. Так, Cheng та ін. розробили модель карбонового потоку для мультиенергетичних систем, інтегруючи різні електромережі між собою [12]. Інші роботи пропонують удосконалення алгоритмів з урахуванням коливань навантаження від електромобілів та різних режимів ринку [13]. Це свідчить про те, що методологія PFT є активною сферою досліджень, орієнтованою на сучасні виклики енергосистем.

Спочатку PFT використовувався переважно для техніко-економічних задач енергетики – наприклад, справедливого розподілу плати за передачу між користувачами мережі. Проте, сьогодні цей підхід набув нового звучання у контексті сталого розвитку. Розуміння того який саме генератор забезпечує конкретного споживача дозволяє визначити т.зв. «паливний мікс» спожитої енергії у конкретній точці мережі [8]. Далі, можна обчислити вуглецевий слід споживання – тобто які викиди CO₂ припадають на даного споживача електроенергії. На відміну від середньозважених показників чи відокремлених сертифікатів, PFT дає локально конкретизовані дані: наприклад, що у певний час на певній підстанції споживання на 40% забезпечене найближчою вітровою електростанцією (ВЕС), на 30% – вугільною теплоелектростанцією (ТЕС), на 20% – газовою теплоелектроцентральною (ТЕЦ) і на 10% – імпортом, відповідно до розв'язку режиму. Таким чином, отримана точна локаційна та часова дискретна інтенсивність CO₂ є значно точнішою у порівнянні із середньорічними чи, навіть, погодинними коефіцієнтами. Це, в свою чергу, робить PFT важливим інструментом для компаній, що прагнуть виконати або випередити нормативні вимоги (як CSRD) і реалізувати свої кліматичні зобов'язання. Згідно з недавнім оглядом від Fraunhofer FIT, впровадження PFT значно покращує якість корпоративного обліку Scope 2 [20] та готує бізнес до посилення регуляторних норм щодо прозорості викидів [19].

Однак, попри свій потенціал, впровадження PFT не є тривіальною задачею. Основна проблема – це доступність високоякісних даних про режими роботи електромережі. Для реалізації PFT потрібна детальна інформація про виробництво кожної електростанції, потужність потоків по лініях, навантаження вузлів в дискретні моменти. На магістральному рівні електромереж такі дані, зазвичай, є доступні системним операторам і частково публікуються (наприклад, ENTSO-E Transparency Platform у ЄС). Однак, на рівні розподільчих мереж, особливо мереж низької напруги, повнота даних є недостатньою. Багато локальних мереж не оснащені потрібними засобами вимірювання і телеметрії для повного моделювання потоків у режимі реального часу, що обмежує точність. Розв'язанням може бути поступове впровадження smart-grid датчиків та систем моніторингу, а також використання методів машинного навчання для оцінки невідомих параметрів. Ще одним викликом є обчислювальна складність при великому масштабі системи. Але, сучасні обчислювальні потужності та оптимізовані алгоритми дозволяють моделювати PFT навіть для великих мереж за відносно недовгий час [9]. Таким чином, основним стримуючим фактором залишається саме проблема даних. Водночас, її поступове вирішення (через цифровізацію енергомереж) очікувано призведе до появи детальних карт вуглецевих потоків електрики, що дозволять споживачам і операторам приймати адаптивні рішення.

Станом на сьогодні, метод PFT вже починає використовуватися в реальних умовах, а саме - в пілотних проектах для оцінки вуглецевого сліду споживання. Яскравим прикладом є проект COVERE² (Collecting, Verifying, Reporting and Reducing GHG Emissions) – ініціатива, підтримана EIT Food у 2023 році, націлена на агропродовольчий сектор [9]. В рамках COVERE² розробляється рішення для збору і верифікації даних про викиди ПГ при виробництві агропродукції з акцентом на споживанні енергії, оскільки аграрні компанії мають труднощі із простежуваністю свого екологічного сліду та браком якісних даних. Тому, запропоноване рішення забезпечує високу деталізацію та перевірку даних про викиди, зокрема проводиться комплексний аналіз споживання електроенергії і пов'язаних викидів ПГ. Завдяки впровадженню PFT сільськогосподарські підприємства отримують інструмент для відстеження і відображення джерел електроенергії, які вони споживають, а також, це дає

можливість гранулярно відстежувати відповідні вуглецеві коефіцієнти. Це дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення та впроваджувати зміни задля більш сталого енергоспоживання. Зокрема, молочно-товарна ферма, котра була обрана в якості пілотного сектора молочної індустрії зможе бачити – яка частка її спожитої електроенергії приходить з відновлюваних джерел, а яка – з викопних, і як це впливає на її т.зв. «вуглецевий літр молока». Відповідно, вона може інвестувати в власну генерацію, або змінити графік роботи електричного обладнання під час періодів, коли в мережі більше «зеленої» енергії. В рамках COVERE² використано програмний інструмент компанії ELEKS – Dakar, що моделює електромережі та має функціонал PFT. Цей продукт був незалежно проаналізований німецьким науково-дослідним інститутом Fraunhofer FIT, який підтвердив надійність методики та можливість її масштабування [19]. За даними Fraunhofer, глибоке опрацювання наукового підґрунтя робить реалізацію PFT в Dakar достатньо точною, щоб використовувати її у промислових рішеннях. Таким чином, проект COVERE² продемонстрував, як PFT може інтегруватися в систему управління викидами на підприємстві. Очікується, що масштабування такого підходу сприятиме підвищенню прозорості енергоспоживання в агросекторі та поширенню практик зниження вуглецевого сліду. Загалом, методика PFT поступово переходить з теоретичних розробок до практичного використання у контексті кліматичних дій. Її подальше впровадження в енергетиці (наприклад, інтеграція в платформи обліку для великих споживачів) та розширення на інші сектори (наприклад, облік «вбудованих» викидів енергії в продукції) може стати вагомим кроком до покращення моніторингу і управління викидами. Для підтримки цього процесу доречно залучати інші сучасні IT-інструменти, зокрема засоби штучного інтелекту, що допоможуть автоматизувати збір і обробку великих масивів даних, необхідних для PFT. Далі, розглянемо можливості технологій великих мовних моделей (LLM) у поєднанні з підходом Retrieval-Augmented Generation (RAG) у сфері відстеження викидів та інформаційної підтримки екологічного менеджменту.

3. Застосування LLM моделей у поєднанні із RAG підходом.

Останніми роками LLM моделі, такі як GPT-3/4, LLaMA, PaLM, Gemini тощо, здійснили революцію в обробці текстової інформації. LLM – це нейронні моделі, навчені на гігантських масивах тексту, здатні генерувати зв'язну людську мову та відповідати на запити, демонструючи розуміння контексту. Проте, відомою проблемою LLM є схильність до галюцинацій – генерування неправдивих фактів в вузькоспеціалізованих чи технічних доменах [14]. Для використання LLM моделей у таких критично важливих сферах, як кліматична політика чи промисловий моніторинг викидів, необхідно мінімізувати ризик дезінформації. Одним із провідних підходів є Retrieval-Augmented Generation (RAG) – генерація відповідей з доповненням пошуком. Суть RAG полягає в інтеграції зовнішньої бази знань: перед формуванням відповіді модель здійснює пошук релевантних джерел (документів, даних) і ґрунтує свою відповідь базуючись на цих фактах. Такий підхід в купі з правильно написаним початковим запитом до мовної моделі згідно загальноприйнятих практик суттєво зменшує частку галюцинацій і підвищує достовірність результату.

Домен захисту довкілля характеризується великим обсягом розрізнених даних і документів: наукові статті, звіти МГЕЗК (IPCC), законодавчі акти, національні стратегії, корпоративні звіти зі сталого розвитку тощо. Відповідно, пошук необхідної інформації часто ускладнюється не лише через широку номенклатуру вищезазначених даних, а й розподіл між різноманітними джерелами їх зберігання. LLM з підтримкою RAG здатні значно прискорити доступ до потрібних знань. Наприклад, система може швидко відповісти на запит «Які цілі зі скорочення метану встановлені у ЄС і як вони впливають на аграрний сектор?», автоматично знайти відповідні параграфи в Європейській стратегії щодо метану та аграрних регламентах і надати користувачу чітку відповідь з посиланнями на джерела. Це підвищує інформаційну обізнаність прийняття рішень у кліматичній політиці [14]. Важливо зазначити, що RAG архітектура дозволяє оновлювати базу знань динамічно – в міру появи нових даних. Таким

чином, модель завжди може бути забезпечена актуальною інформацією (чого позбавлені стандартні LLM, натреновані на статичних даних до певної дати). Крім того, використання RAG дає можливість відстежувати джерела: користувач отримує не тільки відповідь, а й посилання, звідки взято інформацію, що критично в наукомістких і правових питаннях.

Розглянемо переваги використання LLM + RAG у екологічній сфері, а саме, як цей підхід може покращити якість збору даних для PFT підходу [15]. У сфері обліку та контролю викидів ПГ LLM+RAG можуть виконувати кілька корисних функцій:

- Автоматизація збору даних – модель може обробляти великі об'єми текстових звітів, статей, новин у пошуку фактів про викиди, кліматичні ініціативи, технології скорочення тощо, агрегуючи їх для аналітики.
- Інтелектуальна підтримка прийняття рішень – відповідаючи на складні запити природною мовою система знайде відповідні дослідження, проекти та статистику і сформує відповідні висновки.
- Інтеграція різноформатних джерел – LLM може об'єднувати дані з текстів зі статистичними чи сенсорними даними. У контексті PFT це може означати наступне: модель отримує від енергосистеми чисельні дані (наприклад, відсоток потужності з кожного джерела для конкретного споживача), підтягує їх характеристики з документації цих джерел (вуглецеву інтенсивність кожної електростанції, тощо), після чого формує звіт про вуглецевий слід споживання.

Хоч ця технологія є новітньою, проте є й перші приклади її реалізації у кліматичних проектах. На глобальному рівні показовою є платформа Kayros AI – перша в своєму роді метан-орієнтована RAG-LLM система, презентована на COP29 у 2024 році [16]. Вона дозволяє користувачам через текстові запити взаємодіяти з відкритою картою викидів метану, сформованою на основі супутникових даних, та отримувати відповідь простою і зрозумілою мовою. Це робить складну супутникову аналітику доступною на широкий загал і дає можливість громадськості притягати забруднювачів до відповідальності. Приклад Kayros демонструє, що LLM+RAG можуть успішно поєднуватися з даними дистанційного зондування для моніторингу викидів.

В корпоративному секторі також з'являються ініціативи використання LLM для управління даними про викиди. Так, компанія Schneider Electric у 2023 році інтегрувала OpenAI-LLM у свою хмарну платформу Resource Advisor, що призначена для збору та аналізу даних з енергетики і сталого розвитку [17]. Було створено вбудований асистент (copilot), який за допомогою LLM моделі надає клієнтам можливості вдосконаленого аналізу даних, їх візуалізації, підтримки рішень та оптимізації продуктивності. На практиці, це означає, що користувач платформи може сформулювати текстовий запит щодо прогнозу викидів CO₂ по усіх на його підприємствах у наступний період часу (квартал, півроку, і.т.д), а також отримати поради по їх зниженню. Такий підхід спрощує управління емісійними даними для бізнесу та робить аналітику більш доступною для людей, котрі не є експертами у відповідній галузі. Це стає особливо корисним, коли компанії мають подавати регулярні звіти щодо викидів CO₂ згідно з існуючими стандартами, або шукати шляхи досягнення цілей net-zero.

Науковці також експериментують з LLM + RAG для прискорення аналізу кліматичних даних. У 2024 році група дослідників (Juhasz та ін.) представила прототип системи асистента для документів з кліматичного законодавства [14]. Вони зосередились на тому, щоб користувачі мали змогу ставити запитання щодо конкретних кліматичних законів чи політик країн ЄС та отримувати розгорнуту відповідь. Аби досягти цього результату було сформовано спеціалізовану базу даних із текстів кліматичних законів та політик різних країн, а LLM в сукупності із RAG підходом зробило можливим отримати комплексний механізм пошуку. Автори зазначають, що RAG-підхід значно підвищує швидкість доступу до необхідних відомостей і може слугувати інструментом підтримки рішень у сферах з високим рівнем ризику. При цьому, особливу увагу було приділено відповідальному використанню LLM: модель оцінювали за спеціальною методикою на предмет точності та безпечності відповіді, щоб будувати відповідну довіру користувачів.

Ще одним напрямом є застосування LLM + RAG для аналізу корпоративної кліматичної звітності. На основі бази даних «Climate Action 100+» Colesanti Senni та ін. розробили відповідний інструмент для оцінки «транзиційних планів» компаній – їх планів переходу до т.зв. низьковуглецевої діяльності [18]. Було визначено 64 ключові індикатори, за якими повинні оцінюватися такі плани (наявність цілей, інвестицій, заходів, тощо) та натреновано відповідну LLM модель, щоб вона могла автоматично сканувати звітність великих корпорацій на предмет висвітлення цих індикаторів. Результати показали, що у поєднанні з експертними налаштуваннями LLM може масштабовано аналізувати десятки звітів і виявляти прогалини між задекларованими цілями та конкретними кроками їх досягнення. Це свідчить про перспективу використання мовних моделей для аудиту та верифікації кліматичної інформації, що актуально як для інвесторів і регуляторів, так і для громадського контролю.

Наведені приклади підтверджують, що LLM + RAG вже застосовуються для різних аспектів відстеження та аналізу викидів ПГ – від глобального моніторингу до корпоративної звітності. Особливо перспективним видається синергетичне поєднання цієї технології з методами, на кшталт PFT. Як зазначено вище, успішна реалізація PFT потребує збору великої кількості різноформатних даних. Наразі ця робота часто виконується вручну або окремими ІТ-системами. LLM з можливістю здійснювати RAG-пошук можуть автоматично агрегувати, доповнювати та резюмувати потрібну інформацію. Крім того, такий LLM-асистент може пояснювати складні результати PFT людям без відповідного експертного досвіду у галузі екології, слугуючи інтерфейсом між складними моделями і користувачем.

Висновки.

У статті проаналізовано потенціал застосування методу PFT для моніторингу викидів парникових газів у контексті аграрного та енергетичного секторів Європи, а також можливості його поєднання з RAG підходом. PFT демонструє здатність забезпечити точне трасування електроенергетичних потоків та формування об'єктивних показників вуглецевого сліду, що є основою для підвищення достовірності звітності за стандартами Scope 2. Поєднання цього методу з сучасними інструментами штучного інтелекту, зокрема LLM-моделями у рамках підходу RAG, створює передумови для ефективної обробки, аналізу та подання екологічних даних у зрозумілому для користувача форматі. Такий підхід підвищує гнучкість цифрових систем управління викидами та сприяє формуванню інтегрованих рішень для підтримки кліматичних стратегій. Загалом, синергія PFT і RAG-технологій дозволяє створити надійну інформаційно-аналітичну інфраструктуру для досягнення цілей сталого розвитку та вуглецевої нейтральності на різних рівнях — від окремих підприємств до національних систем.

1. IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC (P.R. Shukla et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
2. European Union. (2021). European Climate Law on Achieving Climate Neutrality by 2050 Enters into Force. URL: <https://www.loc.gov/item/global-legal-monitor/2021-08-31/european-union-european-climate-law-on-achieving-climate-neutrality-by-2050-enters-into-force/>.
3. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2021). Updated Nationally Determined Contribution of Ukraine to the Paris Agreement. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf.
4. NDC Partnership. (n.d.). Ukraine. URL: <https://ndcpartnership.org/country/ukr#:~:text=Ukraine%20submitted%20its%20revised%20NDC,zero%20by%202060>.
5. European Parliamentary Research Service. (2023). Climate Impact of the EU Agrifood System. URL: <https://epthinktank.eu/2023/02/07/climate-impact-of-the-eu-agrifood-system/>.

6. Key Figures on climate France, Europe and Worldwide, (2024). URL: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/en/foreword>.
7. European Environment Agency. (n.d.). Greenhouse gas emissions from agriculture. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-agriculture#:~:text=The%20European%20Climate%20Law%20sets,compared%20with%202005%20levels>.
8. EIT Food. (n.d.). COVERE2. URL: <https://www.eitfood.eu/projects/covere2#:~:text=goals%2C%20including%20a%20lack%20of,for%20more%20sustainable%20energy%20consumption>.
9. University of Helsinki. (2023). COVERE² Kickoff: Toward a Net Zero Agri-Food Sector. URL: <https://www.helsinki.fi/en/projects/collecting-verifying-reporting-and-reducing-greenhouse-gas-emission/news/covere2-kickoff-toward-net-zero-agri-food-sector>.
10. Bialek, J. (1996). Tracing the flow of electricity. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 143(4), 313–320. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/abs/10.1049/ip-gtd%3A19960461>. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19960461>.
11. Kirschen, D., Allan, R., & Strbac, G. (1997). Contributions of individual generators to loads and flows. IEEE Transactions on Power Systems, 12(1), 52–60. <https://doi.org/10.1109/59.574923>.
12. Cheng, Y., Zhang, N., Wang, Y., Yang, J., Kang, C., & Xia, Q. (2019). Modeling carbon emission flow in multiple energy systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(2), 3562–3574. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2830775>.
13. Zhu, X., Liu, Z., Shen, R., Wang, Q., Tang, A., You, X., Yu, W., Wang, W., & Mao, L. (2023). Research on an improved carbon emission flow model considering electric vehicle charging fluctuation and hybrid power transaction. Energies, 16(19), 6835. <http://dx.doi.org/10.3390/en16196835>.
14. Juhasz, M., Dutia, K., Franks, H., Delahunty, C., Mills, P. F., & Pim, H. (2024). Responsible Retrieval Augmented Generation for Climate Decision Making from Documents. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2410.23902>.
15. Arslan, M., Mahdjoubi, L., & Munawar, S. (2024). Driving sustainable energy transitions with a multi-source RAG-LLM system. Energy and Buildings, 324, 114827. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114827>.
16. Kayrros. (2024). Kayrros Releases KayrrosAI, First-of-Its-Kind Methane-Focused RAG LLM at COP29. Retrieved from <https://www.kayrros.com/kayrros-releases-kayrrosai-first-of-its-kind-methane-focused-rag-llm-at-cop29/>.
17. Schneider Electric. (2023). Why Schneider Electric Integrated OpenAI LLM for Sustainability Management. URL: <https://perspectives.se.com/blog-stream/why-schneider-electric-integrated-openai-llm-for-sustainability-management>.
18. Colesanti Senni, C., Schimanski, T., Bingler, J., & others. (2024). Combining AI and Domain Expertise to Assess Corporate Climate Transition Disclosures. Swiss Finance Institute Research Paper No. 24-92. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4826207>.
19. Ströher, T., & Strüker, J. (2024). Power Flow Tracing – Analyzing the Embedding of Eleks Dakar in Research and Practice. Fraunhofer Institute for Applied Information Technology FIT. URL: https://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/wirtschaftsinformatik/dokumente/Whitepaper_Power-Flow-Tracing.pdf.
20. Greenhouse Gas Protocol. (2015). GHG Protocol Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. World Resources Institute. URL: https://ghgprotocol.org/scope_2_guidance.

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ОЦІНЦІ ВПЛИВУ ВИПАРІВ ГРИБОВЕЦЬКОГО СМІТТЕЗВАЛИЩА НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Угрин Леся

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

lesya.e.uhryn@lpnu.ua

Abstract. Environmental safety depends on many factors. In particular, these include clean water, uncontaminated soils, and fresh, clean air. At present, this topic is becoming increasingly relevant every day. Due to the war in Ukraine, the ecological situation is worsening. In addition to all the negative consequences related to the effects of military actions in our region, there is another source emitting various chemical substances into the air. This is the Hrybovets landfill. The closure of the landfill and the critical condition of the site require the reclamation of the landfill. This is the relevance of the present study. The work investigates the possibility of using artificial intelligence in an intelligent monitoring system to track the impact of landfill vapors on the region's territory. Therefore, after analyzing the factors of pollution from the region's landfill, an information system was created to collect data and become part of the landfill reclamation project.

Key words: environmental safety, information system, emissions, monitoring, environment.

Анотація. Екологічна безпека залежить від багатьох факторів. Зокрема, це чисті води, незабруднені ґрунти та свіже і чисте повітря. На даний момент ця тема набирає актуальності кожного дня. У зв'язку з війною в Україні екологічна ситуація погіршується. До всіх негативних наслідків пов'язаних з наслідками військових дій у нашій області є ще один об'єкт який виділяє різні хімічні речовини у повітря. І це Грибовецьке сміттєзвалище. Закриття сміттєзвалища та критичний стан об'єкта потребує проведення рекультивації полігону. В цьому і полягає актуальність даного дослідження. В роботі проведено дослідження можливості використання штучного інтелекту в інтелектуальній системі стеження за впливом випарів сміттєзвалища на територію регіону. Тому провівши аналіз чинників забруднення сміттєзвалищем регіону, було створено інформаційну систему, яка збиратиме дані і стане частиною проєкту рекультивації полігону.

Ключові слова: екологічна безпека, інформаційна система, викиди, моніторинг, довкілля.

При забрудненому довкіллі людям в організм потрапляють шкідливі речовини такі як: вихлопні гази, пилюка, пісок і багато інших речовин. Грибовецьке сміттєзвалище - Львівський полігон твердих побутових відходів. З 1958 року до трагедії 1916 року це було головне місце складування сміття зі Львова та навколишніх сіл, розташоване біля села Великі Грибовичі, за кілька кілометрів від Львова. Площа сміттєзвалища перевищувала 38 гектарів і протягом довгих років він був найбільшим забруднювачем довкілля регіону. Оскільки за довгий час експлуатації перевищив дозволені ліміти зберігання відходів і став екологічною загрозою через відсутність сучасних технологій переробки сміття [1]. Довкілля вважається безпечним, коли його стан відповідає встановленим у законодавстві критеріям, стандартам, лімітам і нормативам, що стосуються його незабрудненості, ресурсомісткості, невиснаженості, екологічної стійкості, санітарних вимог, видового різноманіття, здатності задовольняти інтереси громадян [2].

Об'єктом дослідження стало Грибовицьке сміттєзвалище, випари з якого вже довгий час забруднюють навколишнє середовище. Метою роботи є розробка системи автоматизованого моніторингу впливу випарів Грибовицького сміттєзвалища на стан екологічної ситуації регіону і яка дозволить населенню отримувати актуальну інформацію.

Питання забруднення Грибовицьким сміттєзвалищем навколишнього середовища піднімається вже протягом багатьох років. Закриття сміттєзвалища та критичний стан об'єкта

потребує проведення рекультивації полігону. Хоча офіційні дослідження мерії Львова у 2024 році не виявили перевищення норм, незалежні експертизи вказують на систематичне забруднення. Було зафіксовано небезпечні концентрації токсинів, які впливають на здоров'я мешканців навколишніх сіл. В цьому і полягає актуальність даного дослідження. Виділивши основні чинники які впливають на забруднення навколишнього середовища можна розробити інформаційну систему яка стане частиною заходів реформування в сфері утилізації сміття з мінімальним шкідливим впливом на стан довкілля.

Випари та газів, що зростають на Грибовецькому сміттєзвалищі, спричиняють всебічний негативний ефект на екосистему та здоров'я населення. Серед основних чинників такого впливу можна виділити:

- Забруднення повітря шкідливими газами, де ключовими компонентами звалищних викидів є метан, сірководень, аміак і леткі органічні сполуки. Метан діє як парниковий газ, тоді як сірководень є токсичним і супроводжується неприємним запахом, що сигналізує про інші небезпечні газів. Вдихання цих речовин викликає ризики захворювання дихальної системи, зокрема хронічних розладів та раку легень. Випари ведуть до утворення мікроорганізмів і продуктів згоряння, які впливають на якість повітря.

- Забруднення ґрунтів і рослинності, спричинене випаровуванням та інфільтраціями зі сміттєзвалища, що утворюють важкі метали -це може бути кадмій, миш'як, молібден, свинець, кобальт, срібло. Ці речовини мають здатність накопичуватись в рослинності, змінюючи склад видів і структуру фітоценозів у прилеглих районах, що призводить до деградації земель і зменшення біорізноманітності. Дані Держекоінспекції Львівщини свідчать про значне перевищення у прилеглих територіях допустимих рівнів: важких металів(свинець, кадмій, цинк, залізо, марганець) та багато хімічних сполук (нітратів, хлоридів, нафтопродуктів. Ці речовини накопичилися у ґрунтах і потрапляють у сільськогосподарські культури а через них - у продукти харчування.

- Забруднення підземних і поверхневих вод, викликане продуктами інфільтрації та фільтраціями зі сміттєзвалища, які проникають у річку Малехівка та місцеві потічки, спричиняючи накопичення токсичних речовин у водних екосистемах і створюючи загрози для здоров'я населення, що використовує цю воду. Виявили токсичні речовини у водоймах на відстані 1 км від звалища.

- Ризик самозаймання та пожежі, пов'язаний з неконтрольованим утворенням метану та інших горючих газів. Це супроводжується викидом значних обсягів токсичних продуктів горіння, посилюючи негативний вплив на стан повітря регіону та загрозу для людей і довкілля.

- Поширення інфекційних захворювань через викиди зі сміттєзвалища. Оскільки сміттєзвалище є осередком розмноження патогенної мікрофлори і гризунів. Мешканці сіл Малехів і Грибовичі страждають від захворювань, пов'язаних із вживанням забрудненої води та продуктів.

- Економічні збитки: деградація земель знижує їхню сільськогосподарську цінність [3-4].

Основними отруйними речовинами, що випаровуються з Грибовецького сміттєзвалища, є сірководень(токсичний газ із характерним різким запахом, який є маркером інших небезпечних випарів), метан(основний компонент що утворюється при розкладі органічних відходів, є вибухонебезпечним), аміак(токсичний газ, який подразнює дихальні шляхи і може викликати гострі та хронічні захворювання органів дихання), оксид вуглецю(є отруйним, особливо у закритих просторах, а діоксид вуглецю сприяє парниковому ефекту), діоксид азоту, ангідрид сірчистий, а також леткі органічні сполуки й домішки важких металів - свинець, кадмій, цинк, марганець, залізо, а також залишки лугів, кислот і різноманітних хімічних речовин). Особливо небезпечні через наявність відходів військової промисловості на полігоні. Їхня присутність у повітрі створює серйозну загрозу для здоров'я людей та довкілля, тому саме показники цих параметрів будуть основними при створенні інтелектуальної інформаційної системи моніторингу випарів Грибовецького сміттєзвалища.

Враховуючи ці параметри, система моніторингу екологічної безпеки Львівської відображатиме системний підхід до оцінки та контролю якості навколишнього середовища, щоб забезпечити безпеку та здоров'я мешканців регіону.

Інформаційні системи можуть суттєво покращити оцінку впливу випарів сміттєзвалищ через такі функціональні можливості:

- Моніторинг у реальному часі. Впровадження IoT-датчиків дозволяє фіксувати концентрацію токсичних речовин (CH_4 , CO_2 , H_2S) у повітрі та ґрунтах навколо полігону. Такі системи автоматично передають дані на сервери для аналізу.

- Геоінформаційне моделювання. Інтеграція з ГІС-технологіями (наприклад, ArcGIS) дає змогу візуалізувати розповсюдження забруднювачів у просторі та прогнозувати вплив на підземні і поверхневі води та населені пункти за допомогою 3D-моделей. ГІС-технології та супутниковий моніторинг допоможуть візуалізувати просторовий розподіл забруднень за допомогою картографічних інструментів.

- Аналіз великих даних. Спеціалізоване програмне забезпечення типу AMCS Platform аналізує історію викидів, кліматичні умови та ефективність заходів зі зменшення шкідливості. Це допомагає виявляти закономірності у викидах протягом тривалого часу, а також оптимізувати графіки дегазації та рекультивації.

- Громадський доступ до даних передбачає наявність веб-платформи з інтерактивними картами які забезпечують прозорість інформації для мешканців та екологічних організацій [5].

Ключові переваги застосування інформаційних систем це автоматизація збору даних, точність прогнозів, зменшення часу на реакцію при критичних показниках забруднення. Такі системи можуть обробляти тисячі запитів від датчиків одночасно.

В інформаційні системи для мінімізації техногенного впливу можуть бути інтегровані технології які базуються на автоматичній передачі даних до централізованих платформ для аналізу. Причому вбудовані у датчики сенсори фіксуватимуть рівні забруднень повітря, води, ґрунту в реальному часі. Інформаційна система буде містити агента штучного інтелекту і це допоможе прогнозувати екологічні ризики на основі довготривалих даних.

В перспективі застосування інтегрованих систем і технології блокчейн для прозорості стане зможе вдосконалити розробку і зробити її більш ефективною.

Здатність інтелектуальних систем аналізувати широкий спектр параметрів дозволяє розробити адаптивну систему, яка буде частиною заходів по рекультивації полігону[6]. Завдання системи – моніторинг екологічного стану територій поблизу Грибовецького сміттєзвалища, інформування та попередження населення у разі екологічної небезпеки. Система буде поділена на дві складові: користувацький інтерфейс і адміністративну панель. Адміністратор відповідатиме за введення та оновлення даних. Користувацький інтерфейс включає інтерактивну карту Львівської області, розділену на райони. Забруднюючі речовини аналізуються для кожного району, і результати відображаються в графіках, діаграмах та таблицях. Крім того, система включатиме конвертор, який оброблятиме дані забрудників та надаватиме висновки щодо безпеки на території. У цьому контексті, для спрощення сприйняття інформації, буде використано індекс якості повітря (AQI), який конвертує різні забруднюючі речовини в загальний числовий показник, що вказує на рівень безпеки повітря для громадськості [7-12].

Ретельно вивчивши системи-аналоги і виділивши чинники що впливають на забруднення була побудована інформаційна модель, розроблено всі необхідні гранично допустимі норми для забрудників довкілля, створено UML діаграму варіантів використання та розроблено специфікації. В проектувальній фазі була створена база даних та наповнена вхідними даними.

Розроблена система моніторингу включає роботу працівників-адміністраторів системи. Так як у Львівській області визначено 7 районів, то відповідно на кожен район буде свій адміністратор системи, який вноситиме дані для опрацювання і моніторингу. Адміністратор матиме власний логін і пароль під яким зможе увійти в систему і вносити

зміни: додавати показники, оновлювати та видаляти не актуальні дані. Система виконуватиме такі процеси:

1. Вхід в систему адміністраторів:
 - Введення даних для адміністраторів;
 - Перевірка коректності даних для авторизації;
 - Вхід у власний кабінет адміністратора.
2. Додавання даних:
 - Заповнення форми вхідними даними;
 - Перевірка на коректність усіх заповнених полів;
 - Успішне додавання у БД.

Так само щодо вилучення та оновлення даних.



Рис. 1. Схема конвертації даних

Крім того, у складі системи буде впроваджено конвертор, який перетворюватиме інформацію про забрудників на відомості щодо стану навколишнього середовища.

3. Конвертор даних стану навколишнього середовища(рис. 1):
 - Введення вхідних даних у конвертор.
 - Перевірка коректності введених даних.
 - Успішна конвертація даних у формат стану навколишнього середовища.

Таким чином, структура інформаційної моделі, яка є засобом перетворення вхідних даних по викидах сміттєзвалища у стани, що ілюструють рівень безпеки навколишнього середовища матиме вигляд (рис. 2):

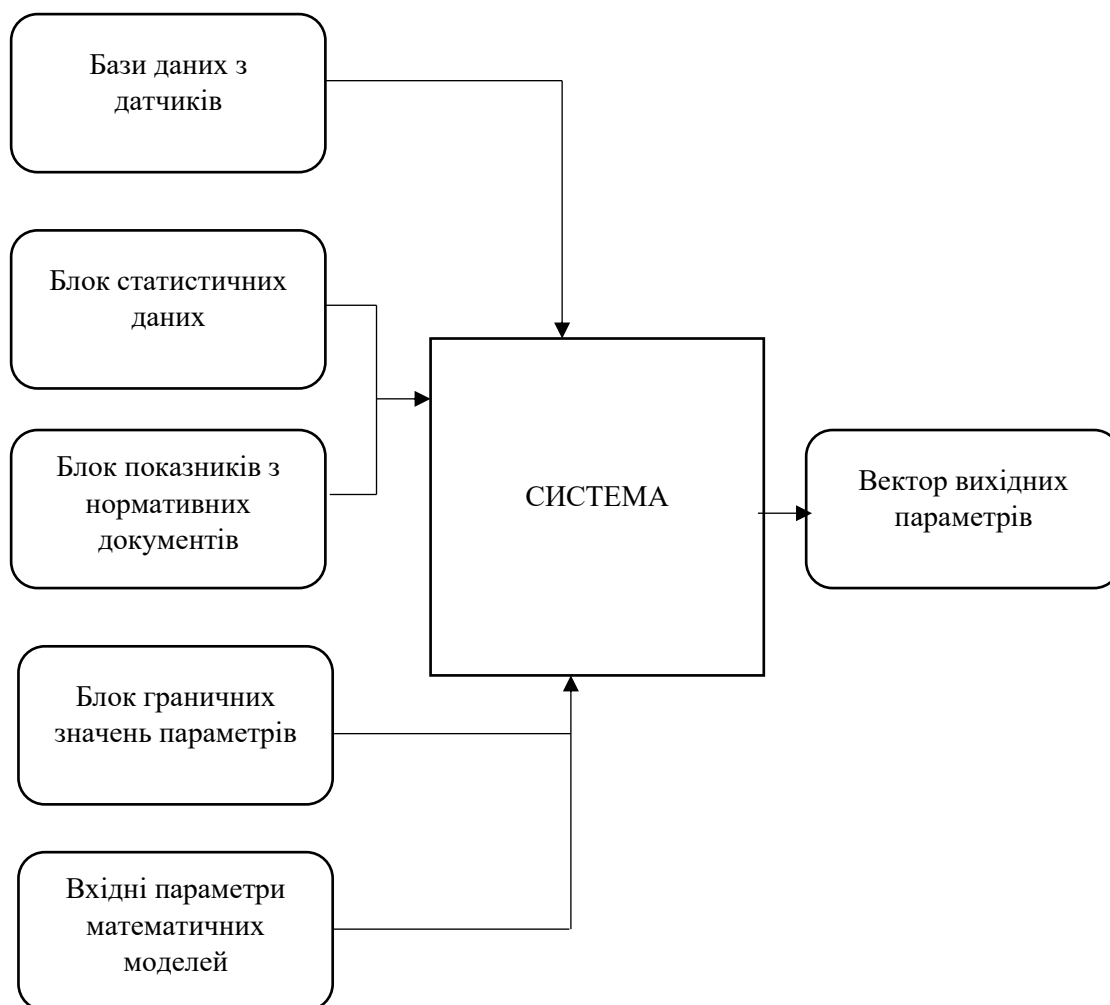


Рис. 2. Інформаційна модель

В проектувальній фазі, базу даних було заповнено адміністратором вхідними даними та доступною для звичайних користувачів інформацією з обраних джерел. В інтерфейсі для звичайних користувачів доступна карта Львівської області і перейшовши на сторінку карти – користувач одразу ж побачить якість повітря в регіоні, а також рекомендації, якщо стан повітря незадовільний.

На карті користувач зможе побачити сегменти - райони Львова в яких є свої датчики. Система отримує дані з різних районів області в тому числі і дані моніторингу повітря з Грибовицького сміттєзвалища і відображає середнє значення по місту. Використання штучного інтелекту для моніторингу впливу Грибовецького сміттєзвалища суттєво підвищує ефективність екологічного контролю та підтримувати прийняття зважених рішень щодо рекультивації. Система розрахована на те щоб користувач міг не лише побачити дані щодо моніторингу повітря та його якості, а й для того щоб користувач міг порівняти між собою ситуацію з різних районів і особливо з Грибовицького сміттєзвалища, та чітко побачити стан повітря в кожному районі. Таким чином користувач сам зможе робити висновки і наявно бачити наскільки випари Грибовицького сміттєзвалища впливають в момент звернення на забруднення навколишніх регіонів.

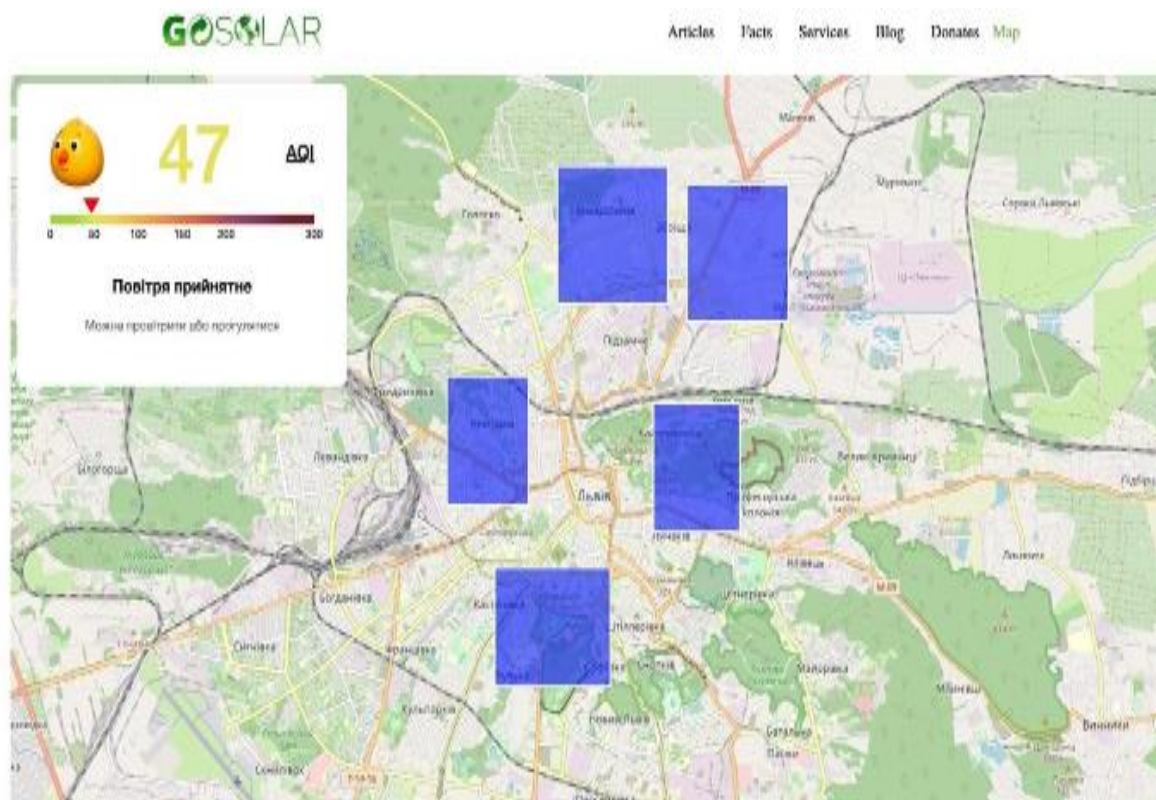


Рис. 3. Інформація для користувача

В даній роботі проведено аналіз доцільності використання інформаційних систем в оцінці впливу випарів Грибовицького сміттєзвалища на навколишнє середовище. Даний аналіз став базою для створення інформаційної інтелектуальної системи з вбудованим штучним інтелектом. Ця система може стати частиною масштабного проекту рекультивації полігону. Полегшена мобільна версія буде інформаційною сторінкою для населення з метою виявлення токсичних газів, забруднення важкими металами поверхневих і підземних вод, інфільтрації забруднювачів у води, зменшення ризику пожеж і поширення інфекцій та своєчасне попередження екологічних катаклізмів.

1. Угрин Л. Є. (2023). Аналіз станів територій природозаповідного фонду загальнодержавного значення. Катовіце, 2023. – С. 41–42.
2. Проблеми будівництва сміттєперобного заводу у Львові та рекультивації Грибовицького сміттєзвалища: історія тривалістю 8 років Отримано з: <https://zahid.espreso.tv/> (11.04.2025)
3. Сміттєзвалища та їх вплив на довкілля Отримано з: <https://www.reline.com.ua/statti/smittezvalyshha-ta-dovkillya/> (21.04.2025)
4. Сміттєзвалища небезпечні для здоров'я? Отримано з: <https://zbruc.eu/node/52016>(21.04.2025)
5. Використання інформаційних технологій в екології та процесах охорони навколишнього середовища (2024) Ю.М. Пархоменко та інші. Отримано з: [https://efaidnbmnnnibpcajpcgicfindmkaj/https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/9\(40\)_I/3.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcgicfindmkaj/https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/9(40)_I/3.pdf)
6. Інтелектуальні технології та системи штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень. Ткаленко О. М. та інші. Отримано з: <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2247>(23.04.2025)
7. Інтелектуальні технології та системи штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень. Ткаленко О. М. та інші. Отримано з: <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2247> (25.04.2025)

8. Нестеренко О. В., Ковтунець О. В., Фаловський О. О. (2017) Інтелектуальні системи і технології. Ввідний курс: Навчальний посібник.- К.: Національна академія управління, 2017,- 90с.
9. Одрехівський М. В.(2010) Методи економіко-математичного аналізу розвитку рекреаційних інноваційних підприємств. Вісник, 2010.
10. Угрин Л. Є. (2012) Аналіз економіко-математичних методів оцінки та прогнозування стійкості та ефективності інноваційних підприємств. Видавництво ЗУКЦ, 2012.
11. Угрин Л. Є. (2024) Система моніторингу екологічної безпеки територій регіонів . Катовіце, – 2024
12. Угрин Л. Є. (2024). Використання інтелектуальних систем в оцінці станів територій природозаповідного фонду. Львів, 2024

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕЗАКОННИХ ЗВАЛИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

Харів Андріана
Національний університет «Львівська політехніка»
м.Львів, Україна
andriana.r.khariv@lpnu.ua

Abstract

This article describes a methodology for automated detection of illegal landfills using satellite imagery and geographic information systems (GIS) tools combined with machine learning algorithms. The process includes training data preparation by annotating images in QGIS, training a machine learning model (in particular, RESNET18), evaluating its performance, and applying it to detect landfills on new images. Special attention is paid to the importance of proper training data preparation, selection of training parameters, and the iterative process of model improvement.

Keywords: geographic information systems (GIS), artificial intelligence (AI), machine learning, QGIS, RESNET18.

Анотація

В даній статті описується методологія автоматизованого виявлення незаконних звалищ за допомогою супутникових знімків та інструментів геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з алгоритмами машинного навчання. Процес включає в себе підготовку навчальних даних шляхом анотування зображень в QGIS, навчання моделі машинного навчання (зокрема, RESNET18), оцінку її продуктивності та застосування для виявлення звалищ на нових зображеннях. Особлива увага приділяється важливості правильної підготовки навчальних даних, вибору параметрів навчання та ітеративному процесу вдосконалення моделі.

Ключові слова: геоінформаційні системи (ГІС), штучний інтелект (ШІ), Машинне навчання, QGIS, RESNET18.

Протягом останніх кількох десятиліть незаконне скидання побутових та промислових відходів стало серйозною екологічною проблемою. Незаконне скидання сміття — це утилізація відходів у недозволених або заборонених місцях, таких як громадські місця, приватна власність або природне середовище. Така недбала та незаконна поведінка включає скидання багатьох видів відходів, таких як побутові відходи , будівельні відходи , відходи заводів та небезпечні відходи . Незаконне скидання сміття створює серйозні екологічні,

соціальні та економічні небезпеки, що вимагає суворих обмежень та превентивних заходів для обмеження його шкідливих наслідків.

Також ця проблема переплітається з питанням в умовах збройних конфліктів, коли руйнування інфраструктури, переміщення населення та загальний хаос призводять до значного збільшення обсягів відходів та ускладнюють їх належну утилізацію. Війна спричиняє утворення будівельного сміття, покинутої техніки, а також може призвести до розповсюдження небезпечних речовин.

Незаконні звалища – це ділянки, де відбувається несанкціоноване розміщення відходів, що суперечить нормам утилізації. Для їхнього виявлення можна використовувати аерофотозйомку (супутникові знімки) для сканування території та ідентифікації звалищ; однак, ця практика ускладнюється ручним виконанням завдання, яке також потребує експертної кваліфікації. Методи машинного навчання можуть допомогти залучити досвід аналітиків та створити автоматизовані інструменти виявлення звалищ. Однак для досягнення цієї мети потрібні публічні високоякісні набори даних для навчання та тестування моделей.

Отже, розробка ефективних автоматизованих систем виявлення незаконних звалищ, пошкоджень внаслідок бойових дій, є критично важливою. Такі системи можуть значно зменшити трудомісткість моніторингу, забезпечити більш швидке та широке охоплення території, а також зменшити залежність від суб'єктивних оцінок. В цій статті досліджується можливість застосування методів машинного навчання для аналізу супутникових знімків з метою автоматичного виявлення та, в ідеалі, класифікації незаконних звалищ, що сприятиме більш ефективному управлінню відходами та захисту довкілля, з урахуванням кризових ситуацій.

Екологічний та соціальний вплив незаконних звалищ та пошкоджень заданих бойовими діями

Незаконне скидання відходів руйнує крихкий баланс екосистем і природного середовища. Скинуті відходи можуть задушити рослинність, знизити родючість ґрунту та засмітити природні дренажні системи. Це втручання має прямий вплив на здатність флори та дикої природи до виживання, можливо, завдаючи довгострокової шкоди біорізноманіттю. Крім того, впровадження сторонніх матеріалів в екосистеми може призвести до витіснення місцевих видів, що призведе до дестабілізації цілих екосистем.

Незаконне викидання відходів значною мірою сприяє забрудненню повітря та води. Неналежна утилізація відходів, особливо таких матеріалів, як одноразовий пластик та шини, призводить до викиду шкідливих сполук у навколишнє середовище. Якщо ці матеріали розкладаються або горять, вони виділяють токсичні хімічні речовини та тверді частинки в атмосферу. Так само водойми навколо незаконних сміттєзвалищ можуть отруїтися, завдаючи шкоди водному життю та створюючи ризики для здоров'я громад, які залежать від цих джерел води.

Також воно створює значну загрозу для здоров'я людини, окрім екологічних наслідків. Звалища можуть стати притулком для шкідників які переносять хвороби, таких як гризуни та комахи, що підвищує ризик проблем зі здоров'ям для місцевого населення. Крім того, отрути та забруднюючі речовини, що утворюються внаслідок незаконного скидання відходів, можуть забруднювати водопостачання або потрапляти в повітря, спричиняючи різноманітні проблеми зі здоров'ям, починаючи від проблем з диханням і закінчуючи серйозними довгостроковими ускладненнями зі здоров'ям.

Економічні наслідки незаконного скидання відходів також є значними. Місцеві органи влади та громади стикаються з фінансовим тягарем очищення та відновлення незаконних сміттєзвалищ, що відволікає ресурси від інших критично важливих послуг.

Проблеми традиційних методів моніторингу незаконних звалищ та пошкоджень заданих бойовими діями

Традиційні методи моніторингу навколишнього середовища, що переважно покладаються на збір даних in-situ, представляють ряд викликів, які контрастують з потенційними перевагами підходів на основі дистанційного зондування. Ключовим недоліком є значні інвестиції в ресурси, необхідні для наземних досліджень, що охоплюють витрати на персонал, логістичні витрати та розподіл часу. Обмеження доступності ще більше обмежують ефективність традиційних методів, оскільки польові групи можуть стикатися з фізичними бар'єрами, ризиками для безпеки (особливо в районах, постраждалих від бойових дій або катастроф) або юридичними обмеженнями, які перешкоджають доступу до критичних пунктів моніторингу. Крім того, притаманна суб'єктивність спостережень людини може внести упередженість та мінливість у збір даних, тим самим зменшуючи точність результатів. На відміну від синоптичного та повторюваного охоплення, пропонуваного дистанційним зондуванням, традиційні методи часто забезпечують обмежену просторову та часову роздільну здатність, перешкоджаючи можливості моніторингу великих територій або відстеження швидких змін навколишнього середовища. Ці обмеження підкреслюють потенціал дистанційного зондування в поєднанні з методами автоматизованого аналізу для забезпечення більш ефективних, комплексних та безпечних рішень для моніторингу навколишнього середовища.

Переваги використання супутникових знімків

Супутникові знімки стали незамінним інструментом у багатьох галузях, особливо в екологічному моніторингу, управлінні ресурсами та реагуванні на надзвичайні ситуації. Їхні ключові переваги роблять їх набагато ефективнішими порівняно з традиційними методами в певних сценаріях:

1. Широке охоплення території:

- Супутники обертаються навколо Землі на великих висотах, що дозволяє їм знімати величезні ділянки земної поверхні за один прохід. Це дає змогу отримувати дані про цілі регіони або навіть континенти, що було б практично неможливо або надзвичайно дорого за допомогою наземних обстежень або аерофотозйомки.

Наприклад, для моніторингу знеліснення в Амазонії супутникові знімки забезпечують повне уявлення про масштаби проблеми, тоді як наземні групи могли б обстежити лише невеликі ділянки.

- У контексті виявлення незаконних звалищ це означає, що можна одночасно сканувати великі території, щоб швидко визначити потенційні місця забруднення, навіть у віддалених районах.

2. Регулярність оновлення даних:

- Супутники постійно обертаються навколо Землі, і багато з них призначені для багаторазового проходження над однією і тією ж областю через певні проміжки часу. Це забезпечує регулярне надходження нових знімків, що дозволяє відстежувати зміни з часом.

- У випадку з незаконними звалищами це дає змогу не лише виявляти їх, а й контролювати їхнє зростання, поширення або спроби очищення. Регулярні знімки можуть допомогти правоохоронним органам і природоохоронним організаціям вживати своєчасних заходів.

3. Можливість моніторингу важкодоступних місць:

- Багато районів землі є віддаленими, небезпечними або важко доступними для людей. Це можуть бути густі ліси, гори, пустелі, зони бойових дій або території, забруднені радіацією чи хімічними речовинами.

- Супутники можуть знімати ці райони без ризику для людського життя та без необхідності складних і дорогих експедицій.

Наприклад, супутникові знімки використовувалися для моніторингу незаконної видобутку корисних копалин у віддалених районах тропічних лісів, де наземний контроль є складним.

Щодо незаконних звалищ, супутники можуть допомогти виявляти їх у місцях, куди важко дістатися, наприклад, у лісових масивах, на приватних територіях або в зонах відчуження.

Загалом, ці переваги роблять супутникові знімки потужним інструментом для широкого спектра застосувань, забезпечуючи ефективний, економічно вигідний і безпечний спосіб збору інформації про нашу планету.

Революція у виявленні та аналізі незаконних звалищ за допомогою ГІС та ШІ

Використання геоінформаційних систем (ГІС) та штучного інтелекту (ШІ) революціонує спосіб виявлення та аналізу незаконних звалищ. Зокрема, навчання алгоритмів виявлення дозволяє автоматично ідентифікувати ці області на супутникових знімках.

Використання геоінформаційних систем (ГІС) та штучного інтелекту (ШІ) спричиняє значні зміни у підходах до виявлення та аналізу незаконних звалищ, пропонуючи більш ефективні рішення порівняно з традиційними методами. ГІС, як комп'ютеризовані системи для роботи з географічними даними, відіграють ключову роль у зберіганні, візуалізації та аналізі інформації про звалища. Вони забезпечують можливість просторового аналізу, що допомагає оцінити вплив звалищ на навколишнє середовище та здоров'я населення, а також інтегруються з іншими технологіями, такими як ШІ, для автоматизації процесів.

ШІ, зі свого боку, привносить в процес здатність до автоматичного розпізнавання образів на зображеннях, отриманих з супутників, що значно прискорює виявлення потенційних звалищ. Алгоритми ШІ можуть бути навчені класифікувати різні об'єкти на зображеннях та виділяти точні межі звалищ, що підвищує точність аналізу. Особливо ефективними є методи глибинного навчання, які дозволяють досягати високої точності у виявленні звалищ.

Поєднання ГІС та ШІ створює потужний інструмент для автоматизованого виявлення та масштабного моніторингу звалищ. Це дозволяє не лише швидше знаходити незаконні звалища, а й аналізувати їх динаміку, приймати обґрунтовані рішення щодо управління відходами та планувати заходи з очищення територій. Таким чином, інтеграція цих технологій революціонує підхід до проблеми незаконних звалищ, роблячи його більш ефективним та інформативним.

Методологія обробки супутникових знімків

Процес базується на навчанні нейронної мережі розпізнавати візуальні патерни, характерні для звалищ. Замість створення моделі з нуля, можна використовувати попередньо створену модель загального призначення, і перенавчити її для конкретної задачі.

1. Створення навчальних даних у QGIS (Рис. 1)

Підготовка якісних навчальних даних є критично важливим етапом у процесі навчання алгоритмів машинного навчання для виявлення об'єктів на зображеннях. У нашому випадку, це означає створення набору даних, де кожен приклад звалища чітко позначений на супутникових знімках. Для цього використовуватимемо програмне забезпечення QGIS, який є чудовим інструментом для вирішення геоінформаційних задач.

1.1. Відкриття зображення в QGIS

Першим кроком є завантаження супутникового знімка, який буде використовуватись для створення навчальних даних, у QGIS. Важливо переконатися, що зображення має правильну географічну прив'язку, щоб подальший аналіз був точним.

1.2. Розгляд прикладів сміттєвих звалищ

Після завантаження зображення необхідно уважно його вивчити, щоб визначити характерні візуальні ознаки сміттєвих звалищ. Це може включати в себе аналіз текстури, кольору, форми та контексту об'єктів. Важливо розрізняти звалища від інших об'єктів, таких як будівельні майданчики, ділянки з вигорілою рослинністю або інші аномалії на зображенні.

1.3. Створення нового шару полігонів

Для позначення меж звалищ у QGIS необхідно створити новий векторний шар полігонального типу. При створенні шару важливо визначити систему координат (CRS), яка відповідає системі координат зображення.

1.4. Оцифрування меж звалищ

Після створення шару можна переходити до оцифрування меж кожного визначеного звалища. Для цього використовуються інструменти редагування QGIS, які дозволяють малювати полігони навколо кожної ділянки. Важливо якомога точніше відтворити контури звалища, щоб забезпечити якість навчальних даних.

Цей процес створення навчальних даних є ітеративним і може потребувати кількох проходів для досягнення достатньої якості. Важливо пам'ятати, що якість навчальних даних безпосередньо впливає на точність та надійність алгоритму машинного навчання, тому цьому етапу слід приділити особливу увагу.

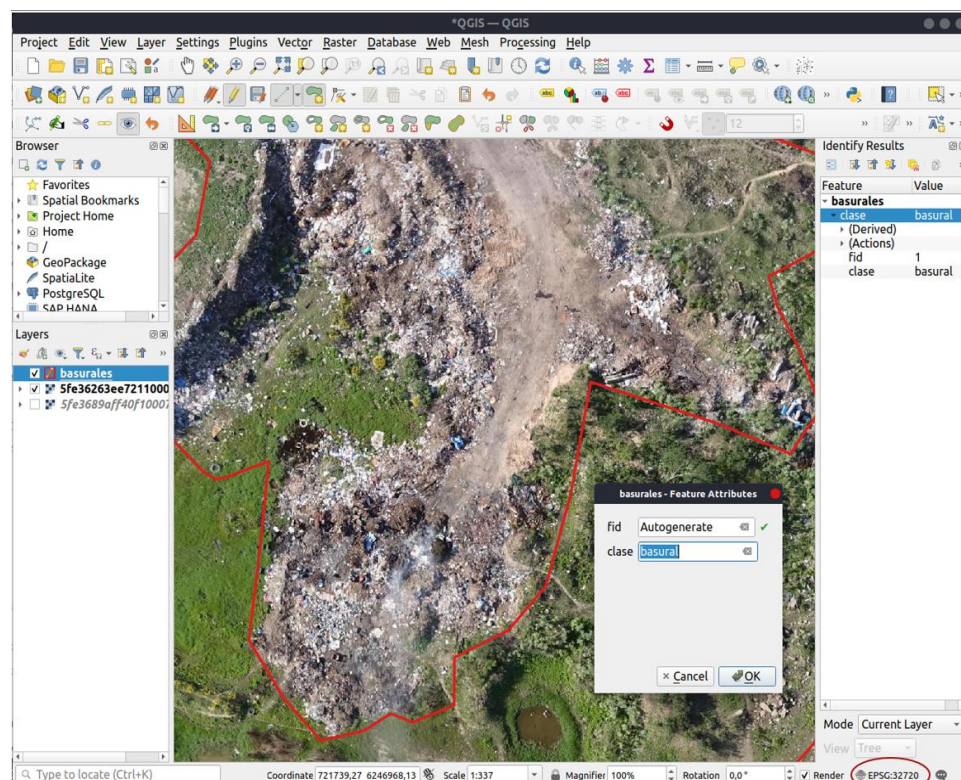


Рис. 1. Створення навчальних даних у QGIS

Процес навчання можна уявити так:

- Алгоритм дивиться на частину зображення.
- Алгоритм порівнює те, що він "бачить", з анотацією (полігоном), яка вказує, де насправді знаходиться звалище.

- Алгоритм коригує свої внутрішні параметри, щоб краще розпізнавати подібні об'єкти в майбутньому.

Після створення анотацій, що окреслюють контури сміттєвих звалищ на зображенні, рекомендується визначити область інтересу (AoI) (Рис. 2). AoI являє собою одну або декілька полігональних областей, які позначають ту частину зображення, що буде піддаватися обробці при навчанні алгоритму. Це особливо корисно у випадках, коли зображення мають значні розміри, а об'єкти інтересу (звалища) зосереджені лише в певних обмежених зонах. Таким чином, вдається уникнути зайвих витрат часу на обробку тих частин зображення, які не містять корисної інформації. На практиці, ефективним підходом виявилось визначення AoI у вигляді буферної зони (тобто області, розширеної на певну відстань) навколо кожного звалища, з радіусом буфера від 1000 до 1500 метрів.

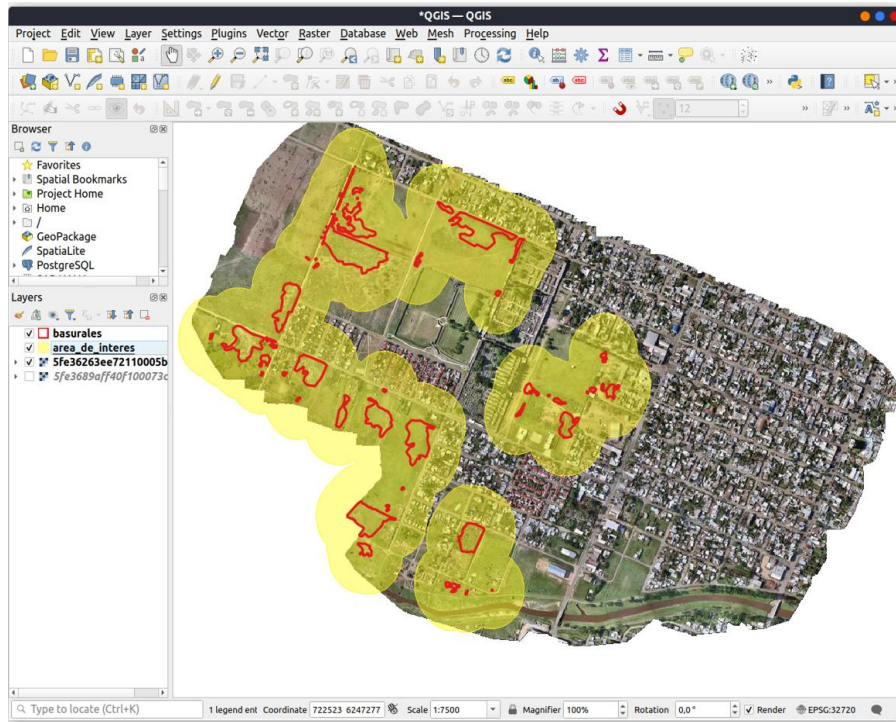


Рис. 2. Область визначення

2. Визначення наборів даних для навчання та перевірки

У процес машинного навчання для виявлення об'єктів, зокрема сміттєзвалищ на зображеннях, критично важливим є правильне розділення доступних даних на дві основні категорії: навчальний набір даних та набір даних перевірки (Рис. 3).

2.1. Навчальний набір даних

Навчальний набір даних відіграє роль "вчителя" для алгоритму. Він складається з пар "зображення - анотація", де кожне зображення містить приклади об'єктів, які ми хочемо навчити алгоритм розпізнавати (у нашому випадку, сміттєзвалища), а відповідна анотація (наприклад, векторний шар з полігонами) вказує на їх точне розташування на зображенні.

Алгоритм обробляє ці дані, порівнюючи свої поточні прогнози з наданими анотаціями, і на основі цього порівняння коригує свої внутрішні параметри, щоб покращити здатність розпізнавати об'єкти в майбутньому.

Для створення навчального набору даних часто застосовується метод випадкової вибірки. З доступних зображень та їх анотацій вибирається певна кількість "вирізків" або невеликих фрагментів, які будуть використані для навчання. Кількість цих вирізків може варіюватися залежно від обсягу доступних даних та обчислювальних ресурсів.

2.2 Набір даних перевірки

Набір даних перевірки, на відміну від навчального, не використовується для безпосереднього навчання алгоритму. Його основна мета - оцінка ефективності вже навченої моделі.

Після кожної "ітерації" навчання, коли алгоритм обробив певну кількість прикладів з навчального набору даних, ми використовуємо набір даних перевірки, щоб виміряти, наскільки добре алгоритм навчився розпізнавати об'єкти.

Це відбувається шляхом проходження алгоритмом всієї області перевірки та реєстрації того, чи правильно він ідентифікує кожний відомий екземпляр об'єкта (наприклад, кожне звалище, яке ми заздалегідь позначили на зображеннях перевірки).

Результати цієї перевірки дають нам уявлення про те, наскільки добре алгоритм узагальнює отримані знання та чи не "перенавчився" він на навчальний набір даних (тобто, чи не почав він занадто добре розпізнавати лише ті приклади, на яких навчався, і погано - нові, невідомі йому).



Рис. 3. Навчальні дані та дані для перевірки

3. Визначення базової моделі та параметрів навчання

У процесі машинного навчання для виявлення об'єктів, зокрема сміттєзвалищ на зображеннях, важливо визначити не лише дані для навчання та перевірки, а й саму архітектуру моделі та параметри, які керуватимуть процесом навчання.

3.1. Базова модель (RESNET18)

Замість того, щоб розробляти модель з нуля, що є складним і ресурсомістким завданням, часто використовується підхід "перенесення навчання" (transfer learning). Це означає використання вже існуючої моделі, яка була навчена на великому наборі даних для вирішення загальних задач розпізнавання зображень, і її "перенавчання" для конкретної задачі.

У даному випадку, як базова модель використовується RESNET18. RESNET18 - це популярна архітектура згорткової нейронної мережі, яка показала високу ефективність у багатьох задачах. Вона має здатність ефективно вивчати складні візуальні ознаки на зображеннях.

Використання RESNET18 як базової моделі дає змогу:

- Зменшити час навчання: Оскільки модель вже навчена на загальних ознаках, потрібно менше часу для її перенавчання на конкретну задачу виявлення сміттєзвалищ.

- Покращити точність: Перенесення знань з великого набору даних часто призводить до кращих результатів, ніж навчання моделі з нуля на обмеженому наборі даних.

3.2. Параметри навчання

Після вибору базової моделі необхідно визначити параметри, які керуватимуть процесом її навчання. Ці параметри впливають на те, як швидко і ефективно модель буде навчатися розпізнавати сміттєзвалища.

4. Оцінювання моделі

Після того, як модель машинного навчання була навчена, надзвичайно важливо оцінити її продуктивність. Першим кроком у цьому процесі зазвичай є застосування навченої моделі до тих самих даних, які використовувалися для її навчання. Це дає нам можливість отримати початкове уявлення про те, наскільки добре модель "запам'ятала" навчальні приклади.

Оцінка моделі на навчальних даних є важливим кроком у процесі розробки системи виявлення стихійних сміттєзвалищ. Вона дозволяє виявити та виправити потенційні проблеми з моделлю, перш ніж застосовувати її до нових, невідомих даних.

5. Застосування на нових даних (Рис. 4)

Після того, як модель демонструє задовільні результати, її застосовують для виявлення об'єктів на нових зображеннях, тобто на тих, які не використовувалися під час навчання алгоритму. Це дозволяє перевірити здатність моделі узагальнювати отримані знання та застосовувати їх до невідомих даних. Нові зображення можуть бути з тієї ж місцевості, але зроблені в інший час, для моніторингу змін, або з інших місцевостей, щоб розширити зону покриття виявлення. Важливо зазначити, що процедура оцінки моделі залишається незмінною як для відомих, так і для нових даних.



Рис. 4. Виявлення сміттєзвалищ на нових зображеннях

6. Удосконалення моделі

Після застосування моделі для виявлення сміттєзвалищ, отримані результати, навіть ті, що були визначені правильно, використовуються для подальшого вдосконалення моделі. Це означає, що результати виявлення стають додатковими даними для її навчання. Додавання нових зображень та відповідних міток сміттєзвалищ сприяє підвищенню продуктивності моделі, особливо її здатності робити точні прогнози в різноманітних умовах. Для цього процес навчання моделі повторюється. Нові набори даних, що включають зображення та анотації, отримані після застосування алгоритму виявлення, об'єднуються з

початковим набором даних, і процес навчання перезапускається для створення більш потужного алгоритму.

Отже, застосування методів штучного інтелекту, зокрема глибокого навчання, у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС), є перспективним підходом для автоматизованого виявлення та аналізу незаконних сміттєзвалищ на супутникових знімках. Цей підхід дозволяє не лише ефективно виявляти наявні звалища, але й здійснювати їх моніторинг, оцінювати динаміку змін та прогнозувати потенційні місця їх утворення.

Важливим аспектом є можливість постійного вдосконалення моделі шляхом додавання нових даних та ітераційного навчання, що забезпечує підвищення точності та розширення області застосування

1. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Science and Systems.
2. Chang, K. (2010). Introduction to Geographic Information Systems.
3. QGIS. Quantum GIS - Open Source Geospatial Foundation Project.
4. J. A. Richards, P. Jia. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.
5. C. Pettit, M. Pettit, R. Klosterman. The Making of Smart Cities. 8. M. F. Goodchild, M. Yuan. Introduction: Big Data in GIScience.
6. Голіна В. В., & Шрамко С. С. (2020). Застосування високих технологій у забезпеченні громадської безпеки. Використання технологій штучного інтелекту у протидії злочинності. Харків.

USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN NATURE CONSERVATION: EXPERIENCE OF IMPLEMENTING SENSING CLUES TOOLS IN UKRAINE

Cherepanyn Roman

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, WWF-Україна

Ivano-Frnakivsk town, Ukraine

E-mails: roman.cherepanyn@pnu.edu.ua, rcherepanyn@wwf.ua, roman.cherepanyn@gmail.com

Franchuk Mykhailo

Nature Reserve «Rivnenskyi»

Chudel village, Ukraine

E-mail: m_franchuk@ukr.net

Abstract. The study explores the application of information technologies in the field of nature conservation amid increasing environmental threats. Particular attention is given to the tools provided by the **Sensing Clues** platform, which support the full cycle of monitoring activities — from field data collection to their analytical processing and visualization. The aim of the study is to analyze the practices of using digital tools in conservation efforts in Ukraine, using the pilot implementation of Sensing Clues technologies in the Nature Reserve «Rivnenskyi» as a case study. The research methodology involved the use of the **Cluey Data Collector** mobile application for data collection, the **FOCUS Data Explorer** analytical platform for classification and aggregation of observations, and the **WildCat** toolkit for spatial visualization and report generation. In 2024, more than 200 observations were conducted within the designated area, covering data on wildlife, flora and fauna, human-wildlife conflicts, and points of interest. The obtained results demonstrated

the effectiveness of digital monitoring in improving the quality of environmental data collection, processing, and analysis, and confirmed the advantages of IT tools in ensuring transparency, accessibility, and improved response speed in ecosystem management.

Keywords: information technology, nature conservation, monitoring, Sensing Clues, data analysis.

Introduction

In the context of global environmental changes and the increasing scale of anthropogenic pressure on the environment, the implementation of innovative technological solutions in the field of nature conservation becomes particularly relevant. Various ecosystems today are under threat due to habitat destruction, poaching, climate change, invasive species, and other factors. In such conditions, ensuring timely and high-quality ecological monitoring, collecting reliable data, and responding quickly to identified threats is critically important.

The use of information technology (IT) in environmental protection activities provides a new level of efficiency in monitoring, analyzing ecological data, and forecasting ecosystem changes (Habibi, 2020; Odongo, 2024). Modern digital tools — including satellite observation systems, geographic information systems (GIS), sensor networks, automated recording devices (camera traps, drones, acoustic sensors), mobile applications, and analytical software — enable high-precision, real-time monitoring of environmental conditions, recording changes in natural environments, analyzing obtained results, and making appropriate management decisions (de Sherbinin et al., 2014; Manfreda et al., 2018).

Information technologies play an important role in the implementation of ecological monitoring systems, which allow not only the recording of the current state of natural objects but also the analysis of trends, the creation of cartographic models, the identification of potential risks, and the provision of scientifically grounded decision-making in environmental protection (Rahman et al., 2014; Dastres & Soori, 2021). Combined with GIS, such data allow for the creation of multidimensional spatial models, which form the basis for effective management of natural territories, planning conservation measures, conducting species inventories and monitoring, as well as reporting to national and international conservation bodies (Balram et al., 2004; Mobaied et al., 2011).

Mobile applications for field data collection, which provide georeferencing, photo documentation, voice and text notes, as well as automatic synchronization of information with central databases, have demonstrated particular popularity and effectiveness. These applications significantly simplify and accelerate the processing of information (Sensing Clues, 2023).

The participation of the public and non-governmental organizations in the process of collecting ecological information, made possible by IT tools, plays a special role. Approaches such as citizen science significantly expand the geography and frequency of observations, contributing to increased environmental awareness among the population and enhancing transparency in the management of natural resources (Pocock et al., 2017; Koedel et al., 2024). For example, citizens can report sightings of injured animals, instances of poaching, or illegal logging through mobile applications, which is an important component of integrated monitoring.

The aim of this study is to analyze global and domestic practices of using information technologies in nature conservation, using the example of the toolset from Sensing Clues — a Dutch non-profit organization specializing in implementing digital technologies in wildlife conservation. The relevance of this research is determined by the need to find effective technological solutions that address the challenges posed by the current environmental state in Ukraine.

Sensing Clues was founded in 2017 with the goal of creating technological solutions to combat biodiversity threats. Its mission is to provide conservation organizations with convenient, accessible, and effective digital tools for collecting, processing, analyzing, and visualizing ecological data.

Currently, Sensing Clues tools are used in more than 15 countries across 4 continents: Africa (Kenya, South Africa), Asia (India), Europe (Bulgaria, Ukraine), South America, and more. The total area covered is approximately 8 million hectares of natural territories. The primary users are staff from national parks, biosphere reserves, forestry enterprises, research centers, as well as non-governmental environmental organizations.

In Ukraine, Sensing Clues collaborates with WWF-Ukraine, providing technical support for monitoring large predators — Eurasian lynx (*Lynx lynx* L.), brown bear (*Ursus arctos* L.), and gray wolf (*Canis lupus* L.) biodiversity in general (Cherepanyn et al., 2023; 2024) in model areas of the Ukrainian Carpathians and Polissya (Verkhovynskyi National Nature Park, Yasinia Forest and Hunting Enterprise of the State Enterprise "Forests of Ukraine" in the Ukrainian Carpathians; Nature Reserve «Rivnenskyi», National Nature Park «Nobelsky» in Ukrainian Polissya). Their tools allow for the effective collection and analysis of data, which helps to implement the norms and requirements of national and international conservation documents: National Species Conservation Action Plans, the Carpathian Convention, biodiversity agreements, the Sustainable Development Goals (SDGs), EU directives, and more.

Methodology

The main solutions for addressing monitoring and conservation issues from Sensing Clues are the following products, which cover the entire process cycle from planning monitoring activities and data collection to data analysis, appropriate visualization, and the adaptation of further research. These tools promote a comprehensive approach to solving conservation and biodiversity preservation problems by integrating data and scientific results into a single, accessible system for various participants in monitoring programs.

Cluey Data Collector (Cluey) — a mobile application for field data collection, allowing users to record observations, tracks, movements, and other important data offline, with the option to synchronize collected information later. Cluey is a basic tool used during the early stages of monitoring activities and field data collection cycles. This application is a crucial element in ecological monitoring, providing real-time access to data and synchronization, reducing the likelihood of errors and inaccuracies in the field. It allows users to work in remote areas where stable internet connections are unavailable, ensuring the continuity of the data collection process. Cluey is widely used by conservationists, foresters, and wildlife managers as a tool for collecting and synchronizing monitoring data on biodiversity and ecological conditions of territories. As a result, Cluey not only enhances data collection efficiency but also ensures that the data is stored in a central database accessible to all registered participants in relevant groups. Such data synchronization between participants helps improve collaboration and real-time information exchange (Sensing Clues, 2023).

FOCUS Data Explorer (Focus 360) — a basic analytical tool for data overview and analysis aimed at wildlife conservation and improving situational awareness for employees of conservation organizations, foresters, and other responsible personnel. This data processing tool allows users to integrate information from various sources, classify it, and cluster it according to necessary parameters and criteria. Focus 360 helps visualize the obtained information in the form of interactive maps, graphs, and charts, which allows for effective assessment of the situation in the area and prompt decision-making. Additionally, the tool allows for the analysis of the effectiveness of conservation measures and monitoring of changes occurring in different ecosystems (Sensing Clues, 2023).

WildCat (Wildlife Conservation Analytical Toolbox) — an advanced set of analytical tools used to create maps, reports, and forecast potential threats, enabling effective planning of conservation measures. This tool allows users to work with large datasets, including observations, ecological indicators, and anthropogenic threats, predicting their impact on biodiversity. WildCat enables necessary processing of collected data and the creation of various maps and reports in a user-friendly software environment, significantly improving the decision-making process.

Forecasting potential threats, such as poaching, climate change, or other anthropogenic impacts, is an important tool for planning conservation activities (Sensing Clues, 2023).

Results

For example, let's consider the work conducted using Sensing Clues tools in the Nature Reserve «Rivnenskyi». In 2024, using Cluey Data Collector, a total of 213 observations were made by seven users within two working groups on the reserve's territory (Figure 1). This includes both direct recording of biodiversity objects and other manifestations of natural or anthropogenic factors that are important for conservation. Data collection took place over several months of active monitoring and included both planned patrols and occasional trips within the protected area. The activity of the users was unevenly distributed, reflecting both the specific tasks of each group and the accessibility of certain areas.

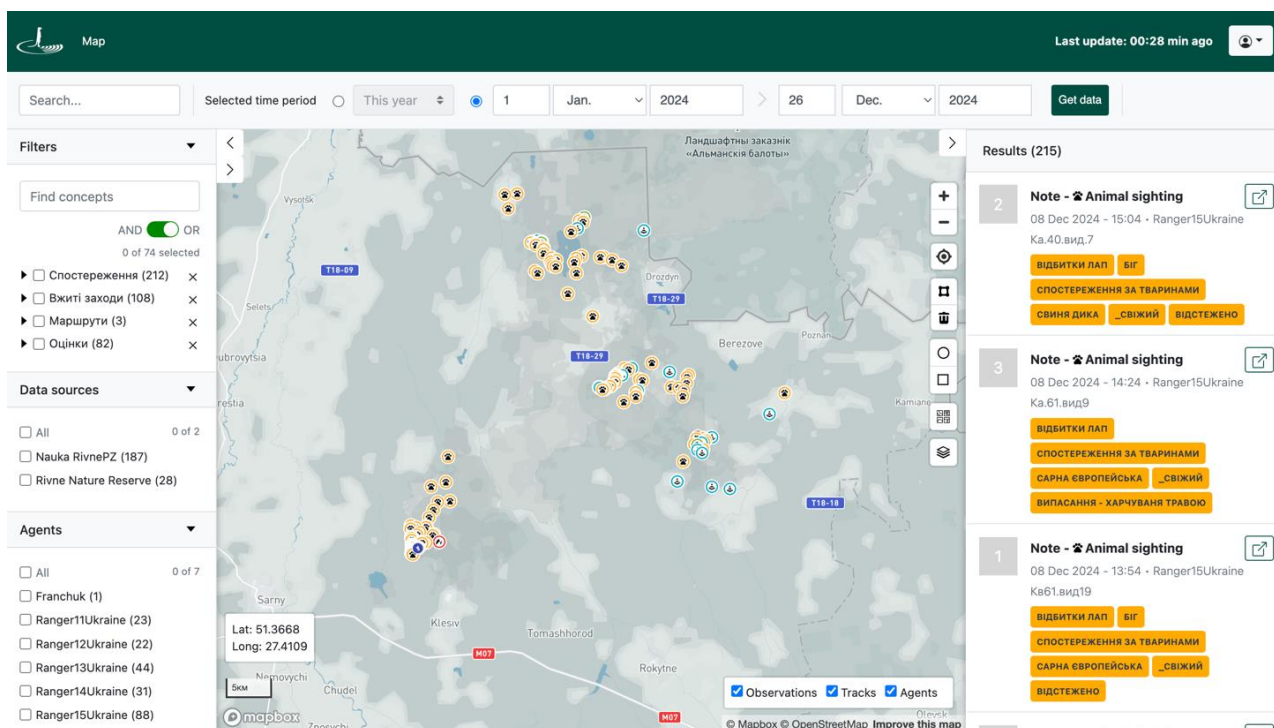


Figure 1. View of the FOCUS Data Explorer program for analyzing collected field data in the Cluey Data Collector app throughout 2024

In particular, in FOCUS Data Explorer, it can be traced that in two groups (Data sources — «Nauka RivnePZ» and «Rivne Nature Reserve»), the same seven users (Agents) collected 213 observations, of which 109 actions were directly conducted at data collection locations — this includes actions such as photo documentation, tracking, the construction of technical structures (e.g., salt licks or bridges), inspection, description of tracks, etc. At the same time, 82 of these observations were classified by categories — this allows for thematic classification of observed objects based on various characteristics, including age (juvenile, mature, old), behavioral traits of animals (feeding, resting, movement), as well as legal status of the recorded phenomena (legal or illegal activities). Classification increases the accuracy of data processing, enabling faster identification of priority objects for monitoring.

The system also registered 3 routes, which allows not only tracking the movements of field teams but also recreating the spatial structure of their activities. The presence of such routes is useful for optimizing logistics for future trips, comparing activity over different periods, as well as for mapping dangerous or problematic areas.

An analysis of the thematic focus of the observations shows that out of the 213 data units collected, 172 are related to animal observations, 5 — to the identification of human activities in the reserve area (e.g., unauthorized entry, household waste, transport tracks), 5 — to conflicts between humans and wildlife (e.g., habitat interference, wild animals near human settlements), and another 32 — to the recording of "points of interest", including natural or technological objects important for further research (springs, bridges, salt licks, camera trap locations, feeding sites, etc.). This data structure allows for the formation of thematic cuts for various aspects of ecological monitoring, particularly anthropogenic risks, infrastructure conditions, or specific animal needs.

A heatmap was created in the Wildlife Conservation Analytical Toolbox (WildCat), which displays the spatial density and distribution of field observations (Figure 2). This map allows for the analysis of not only the intensity of observations in different parts of the reserve but also the identification of potentially problematic areas or zones of biological activity concentration. These "hot zones" can be important for strategic patrol planning, detection of illegal activities, or determining priority areas for biological monitoring. Such visualizations can also serve as evidence for reporting to national conservation authorities or international partners.

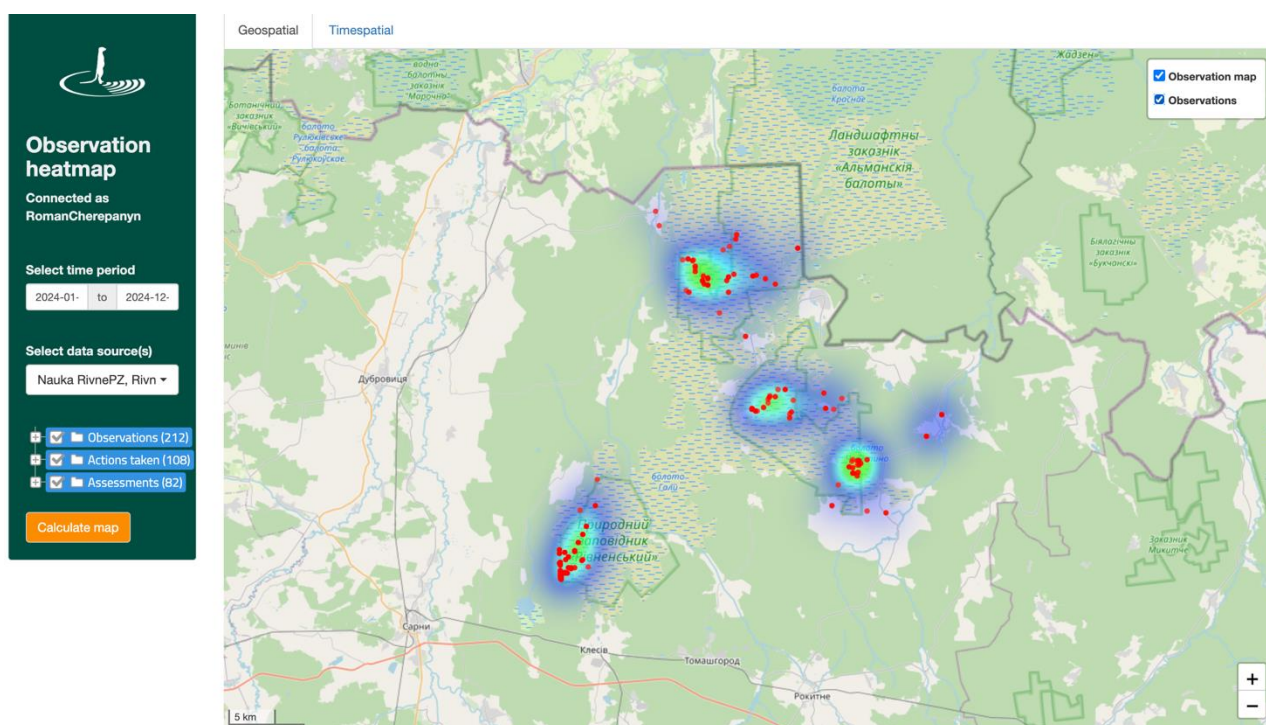


Figure 2. Heatmap of observations during 2024 created using the Sensing Clues "Wildlife Conservation Analytical Toolbox"

In addition, a number of thematic reports were generated in WildCat, allowing for a more in-depth analysis of the collected data. These reports include the classification of observations by object type (e.g., animal species, habitat features, signs of human activity), as well as an analysis of the number of observations over time by month (Figures 3, 4). Such visualizations help identify seasonal patterns, which are extremely important for planning observation periods, tracking fauna activity, and anticipating the appearance of certain species. They can also be useful for planning staff workload throughout the year or selecting the optimal time for future field research.

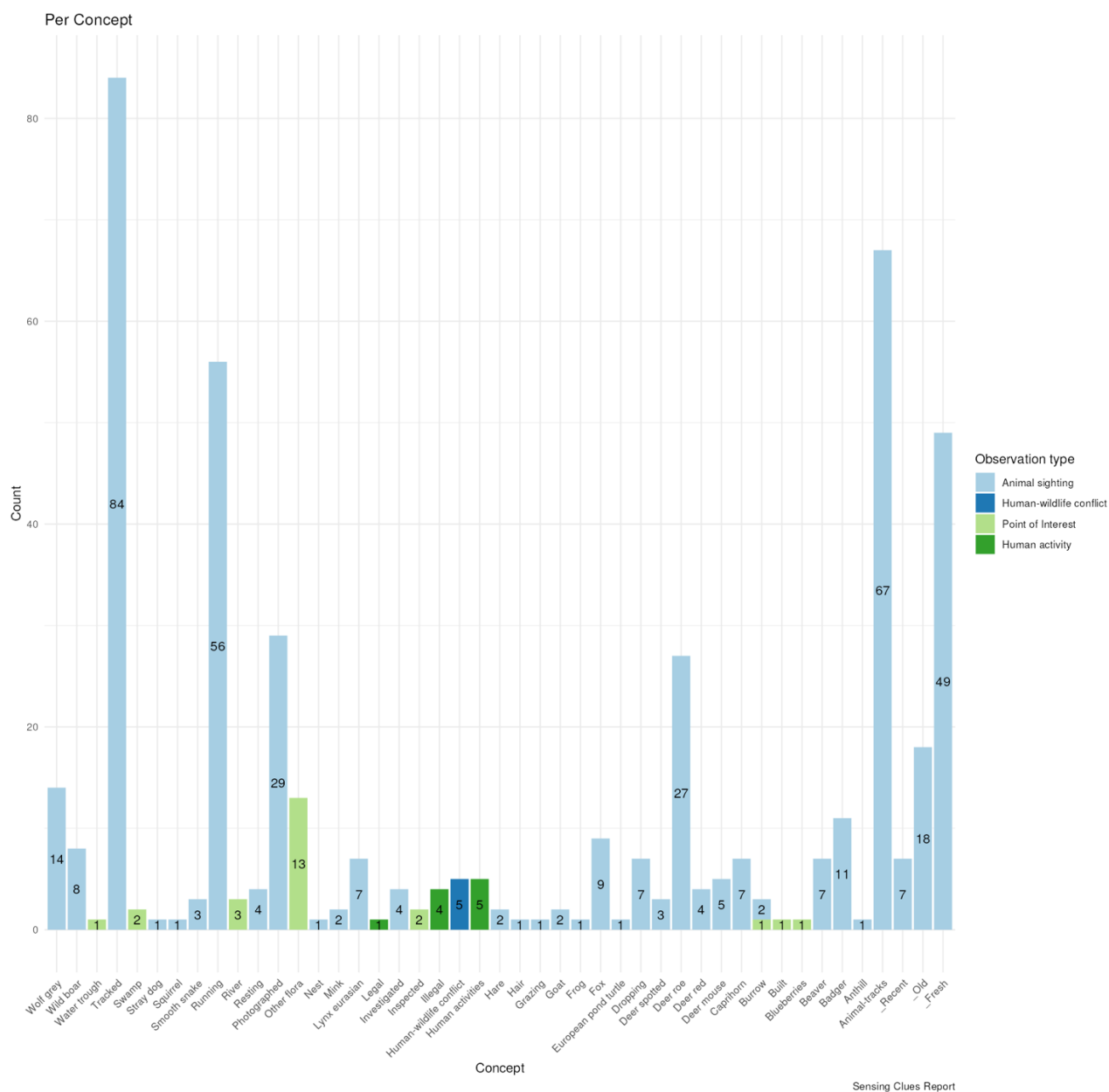


Figure 3. Report on the number of conducted observations by objects («concept») and types of observations

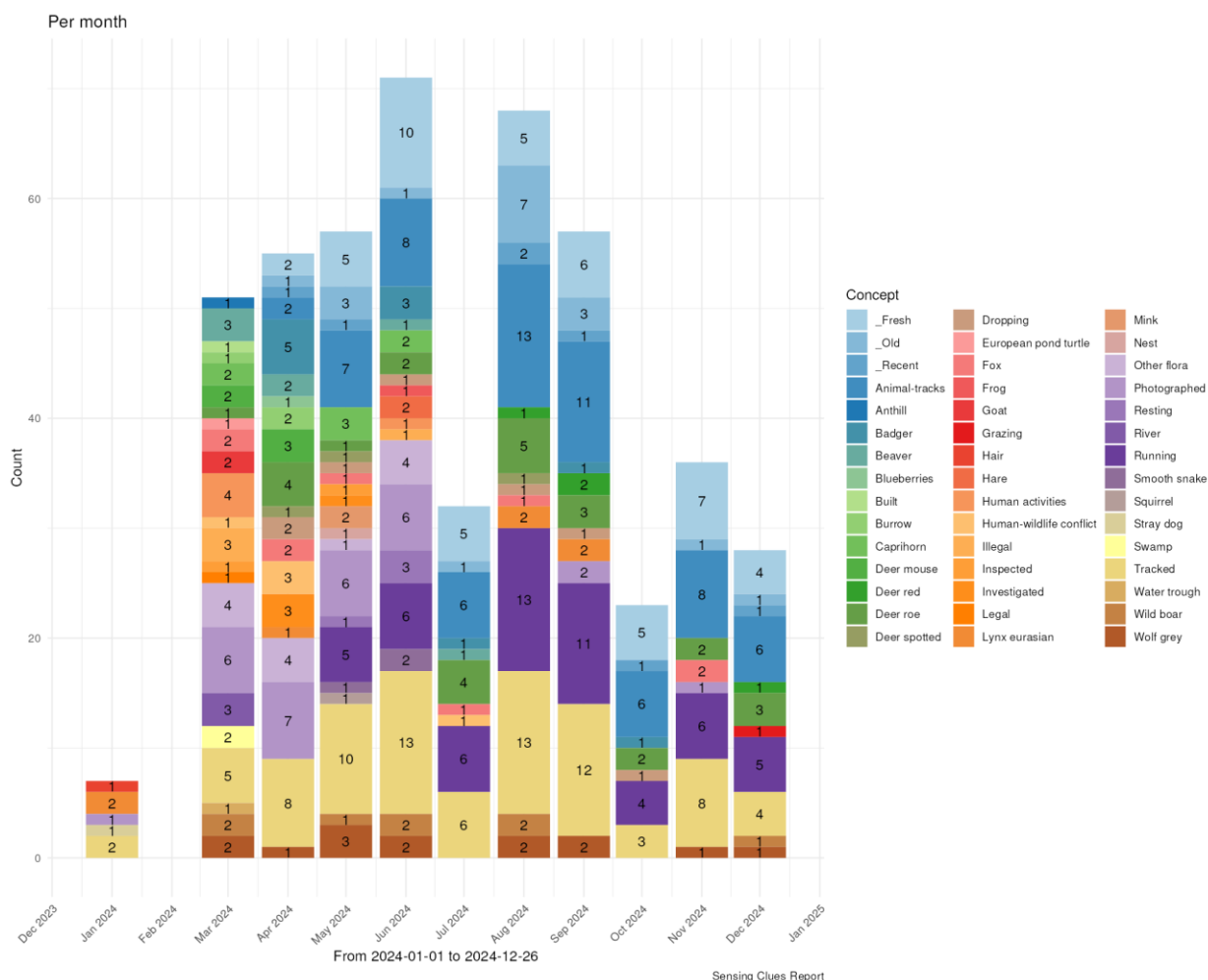


Figure 4. Report on the number of observations per object ("concept")/type according to the months in which they were conducted

With the functions provided by WildCat, it is also easy to identify the most active users, particularly those who have collected the highest number of observations (Figure 5). This enables managers of institutions to assess the activity level of individual staff members or volunteers, analyze their contributions to the overall data collection process, and make informed decisions regarding resource allocation, personnel motivation, and team formation for specific tasks. Such metrics can also be used to develop incentive systems, support professional development, or designate responsible individuals for specific monitoring directions.

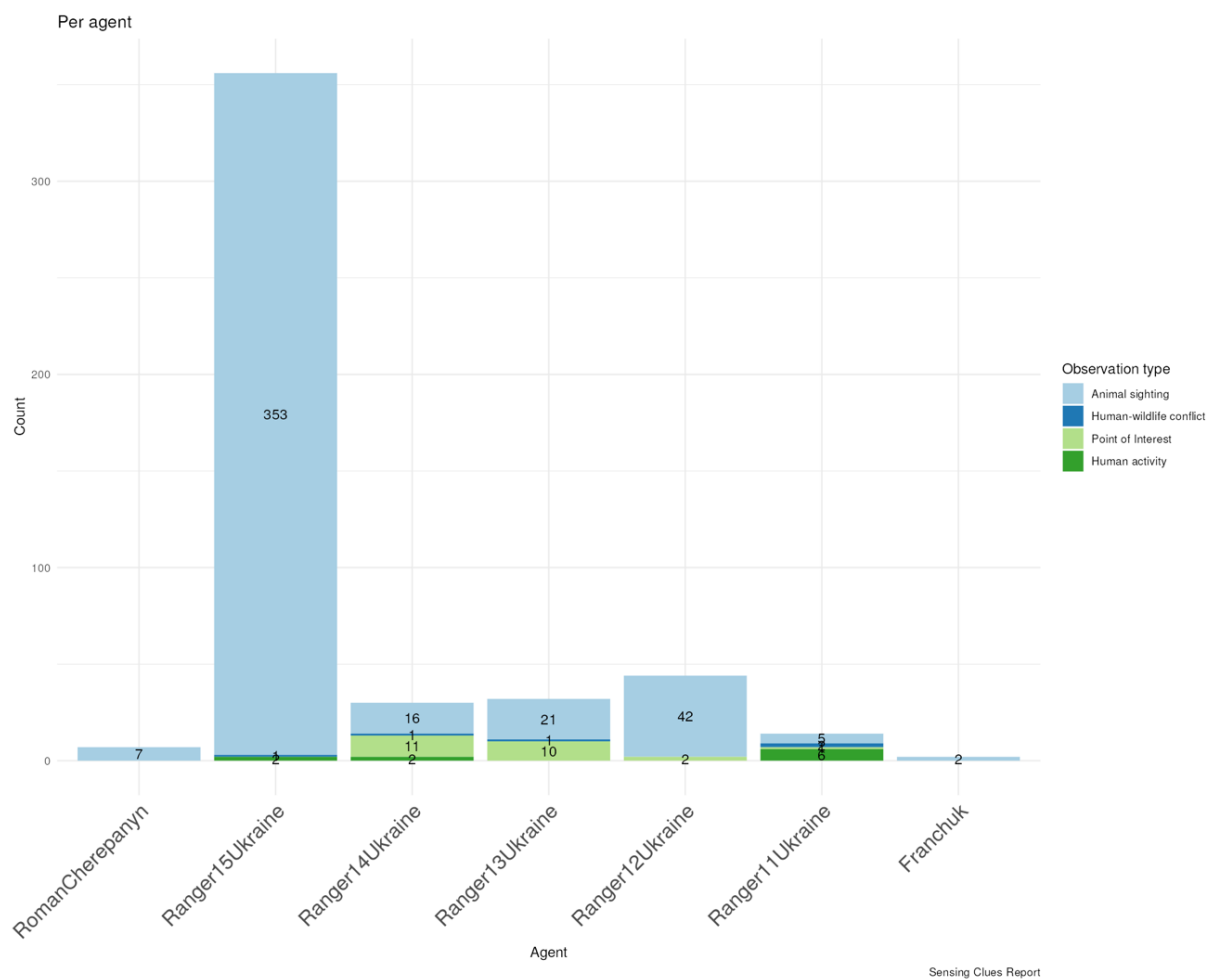


Figure 5. Report showing the number of observations, categorized by type, conducted by individual users of the Cluey Data Collector mobile application developed by Sensing Clues

Moreover, the results obtained within the Nature Reserve «Rivnenskyi» demonstrate the potential for further scaling of this approach. For example, involving additional observation groups — both researchers and community activists — into the existing platform could significantly increase the volume and accuracy of collected data. Thus, Sensing Clues tools not only contribute to the technological modernization of fieldwork but also help establish the foundation for an open ecosystem of nature conservation monitoring, based on factual, verified data accessible for analysis, management, and strategic decision-making. The integration of such solutions into national strategies would enable Ukraine to reach a qualitatively new level of nature conservation aligned with international standards.

Conclusions

The integration of information technologies into the field of nature conservation opens new horizons for effective ecosystem management, the implementation of modern monitoring approaches, biodiversity conservation, and timely responses to environmental threats. The conducted study demonstrates the high potential of using IT solutions — particularly the tools provided by the Sensing Clues platform — in the field of nature protection and environmental monitoring. The Sensing Clues tools have proven their practical value in both international and national contexts, enabling a comprehensive approach to monitoring, threat forecasting, operational decision-making, and strategy development.

The system's advantages include automation of data collection and processing, unification of observations into a single database, transparency and open access to information, the availability of

user-friendly visualization tools for better understanding of spatial processes, as well as the possibility of integration with other conservation platforms. Using the example of the Nature Reserve «Rivnenskyi», it has been shown that the application of digital solutions — such as Cluey Data Collector, FOCUS Data Explorer, and WildCat — significantly increases the efficiency of data collection, processing, analysis, and visualization of ecological information. These tools provide a qualitatively new level of control over the state of the natural environment, help detect biodiversity threats, monitor human impact, and support the planning of conservation measures.

Further scaling of these tools in Ukraine could substantially contribute not only to the preservation of natural resources but also to adapting the nature conservation system to modern challenges and ensuring its sustainable development.

Acknowledgements

All the work was funded and coordinated by WWF-Ukraine through the "Nature FIRST" project, co-financed by the European Commission, HORIZON Research and Innovation Actions (grant agreement ID 101060954 "Nature FIRST"), and the "Coexistence for Conservation" project (supported by WWF-Poland).

1. Balram, S., Dragičević, S. & Meredith, T. (2004). A collaborative GIS method for integrating local and technical knowledge in establishing biodiversity conservation priorities. *Biodiversity and Conservation* 13, 1195–1208. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000018152.11643.9c>
2. Cherepanyn R.M., Vykhor B.I., Biatov A.P., Yamelynets T.S., Dykyy I.V. Population dynamics and spatial distribution of large carnivores in the Ukrainian Carpathians and Polissya // *Biosystems Diversity*, Vol. 31, No 1. 2023. – P. 10-19. <https://doi.org/10.15421/012302>
3. Cherepanyn R. M., Zelenchuk Y. I., Yamelynets T. S., Vykhor B. I., & Andreychuk Y.M. (2024). Large carnivores and farmers/beekeepers conflicts in the Ukrainian Carpathians: structure, dynamics, spatial distribution and effective coexistence measures. *Biosystems Diversity*, 32(3), 324-333. <https://doi.org/10.15421/012435>
4. de Sherbinin, A., Levy, M. A., Jaiteh, M., Zell, E., & Weber, S. (2014). Using satellite data to develop environmental indicators. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084013>
5. Habibi, S. (2020). A review of ICT-based applications to monitor environmental parameters. *Construction Innovation*, 20(1), 112–127. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2019-0043>
6. Dastres, R., & Soori, M. (2021). The Role of Information and Communication Technology (ICT) in Environmental Protection. *Figshare*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14805798>
7. Koedel, U., Dietrich, P., Herrmann, T., Liang, C., Ritter, O., Roettenbacher, J., Schuetze, F. M., Schuetze, S. V., Thoboell, J. C., & Schuetze, C. (2024). Enhancing citizen science impact in environmental monitoring: Targeted engagement strategies with stakeholder groups. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1375675. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1375675>
8. Manfreda, S., McCabe, M. F., Miller, P. E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., Ben Dor, E., Helman, D., Estes, L., Ciruolo, G., Müllerová, J., Tauro, F., De Lima, M. I., De Lima, J. L. M. P., Maltese, A., Frances, F., Caylor, K., Kohv, M., Perks, M., ... Toth, B. (2018). On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 10(4), 641. <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
9. Mobaied, S., Machon, N., & Riera, B. (2011). Biodiversity conservation GIS: Using geographic information systems to support conservation management decisions. *ACM SIGSPATIAL Special*, 3(2), 19–26. <https://doi.org/10.1145/1999320.1999379>
10. Odongo, R. (2024). Remote Sensing Applications in Environmental Monitoring. *European Journal of Natural Sciences*, 1(1), 1–12.

11. Pocock, M. J. O., Tweddle, J. C., Savage, J., Robinson, L. D., & Roy, H. E. (2017). The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science. *PLOS ONE*, 12(4), e0172579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172579>
12. Rahman, M.R., Shi, Z.H. & Chongfa, C. (2014). Assessing regional environmental quality by integrated use of remote sensing, GIS, and spatial multi-criteria evaluation for prioritization of environmental restoration. *Environ Monit Assess* 186, 6993–7009. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3905-4>
13. Sensing Clues. Solutions for smart conservation. (2023). Retrieved from <https://www.sensingclues.org>

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ НАВЧАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ХВОРОБ РОСЛИН

Чешенко Дмитро

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

м. Дніпро, Україна

dmitry.cheshenko@gmail.com

Мацуга Ольга

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

м. Дніпро, Україна

olga.matsuga@gmail.com

Abstract. This study investigates the practical aspects of training convolutional neural networks for plant disease classification using the “Plant Disease Classification Merged Dataset,” which includes both laboratory and field images of 88 classes of diseased and healthy plants. Data augmentation was applied to balance the classes and increase data variability. Over 50 experiments were conducted with different architectures, hyperparameters, and regularization techniques. The optimal model configuration was found to include 4–5 blocks of paired convolutional layers (3×3 kernels), MaxPooling, GlobalAveragePooling, Batch Normalization, Dropout, SpatialDropout2D, the SGD with momentum as optimizer, and CosineDecay. The best-performing model achieved an accuracy of approximately 94.7% on the test set. The results provide practical recommendations for developing robust convolutional neural network models.

Key words: convolutional neural networks, CNN, plant diseases, image classification, deep learning, computer vision.

Анотація. У роботі досліджено практичні аспекти навчання згорткових нейронних мереж для класифікації хвороб рослин на основі датасету “Plant Disease Classification Merged Dataset”, що містить лабораторні та польові зображення 88 класів хворих та здорових рослин. Для балансування класів та підвищення варіативності даних застосовано аугментацію. Проведено понад 50 експериментів з різними архітектурами, гіперпараметрами та методами регуляризації. Встановлено, що оптимальна конфігурація моделі включає 4–5 блоків парних згорткових шарів (ядра 3×3), MaxPooling, GlobalAveragePooling, Batch Normalization, Dropout, SpatialDropout2D, оптимізатор SGD з імпульсом та CosineDecay. Найкраща модель досягла точності ~94.7% на тестовому наборі. Отримані результати містять практичні рекомендації для розробки стійких моделей згорткових нейронних мереж.

Ключові слова: згорткові нейронні мережі, CNN, хвороби рослин, класифікація зображень, глибоке навчання, комп'ютерний зір.

Вступ і постановка задачі. Згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) зарекомендували себе як один із провідних підходів до розв’язання широкого спектра задач комп’ютерного зору, зокрема задачі класифікації зображень. Вони здатні автоматично виявляти релевантні ознаки зображень без необхідності ручної інженерії ознак, що суттєво спрощує побудову ефективних моделей. Крім того, CNN формують ієрархічні представлення вхідних даних: від низькорівневих текстур і контурів до високорівневих об’єктів і концептуальних образів. Завдяки цим властивостям згорткові нейронні мережі стали базовим інструментом для розв’язання задач автоматизованого аналізу візуальної інформації, таких як класифікація, сегментація, детекція та інші [1, 2].

Однією з перспективних галузей застосування CNN є діагностика хвороб рослин за візуальними ознаками, зафіксованими на зображеннях. Традиційна експертна оцінка стану рослин часто є трудомісткою, часозатратною та схильною до суб’єктивних помилок. Натомість використання CNN дозволяє автоматизувати та оптимізувати процес моніторингу, зробивши його більш об’єктивним, точним і масштабованим. Це відкриває можливості для раннього виявлення захворювань, своєчасного застосування засобів захисту та, як наслідок, мінімізації втрат врожаю та підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.

Уже перші дослідження засвідчили високу ефективність CNN у задачі класифікації хвороб рослин. Наприклад, у 2016 році при використанні архітектур AlexNet та GoogleNet було досягнуто точності 99.35% на одному з найвідоміших та часто застосовуваних наборів даних – “PlantVillage” [3]. Подальші експерименти з використанням інших архітектур підтвердили ці результати, зокрема модель DenseNet-121 досягла точності 99.75% на тому самому наборі даних [4]. Такі успіхи спряли активному розвитку застосування глибокого навчання в аграрній сфері. Втім, слід зауважити, що набір “PlantVillage” складається із зображень, зібраних у контрольованих лабораторних умовах на однорідному фоні. Зображення цього датасету характеризуються чітко відокремленими листками на простому, зазвичай білому або сірому фоні, що значно полегшує задачу класифікації для нейронних мереж. Такий формат даних суттєво відрізняється від реальних польових умов, де спостерігається висока варіативність освітлення, ракурсів, фону, а також можливе перекриття чи пошкодження листків. Як наслідок, при перенесенні моделей, навчених на “PlantVillage” або подібних наборах, на зображення, зібрані в реальних польових умовах, часто спостерігається суттєве зниження точності. Так, у роботах [3, 5] було показано, що при класифікації зображень, отриманих з Bing Image Search та IPM Image, точність таких моделей може зменшуватися до 30–36%. Це підкреслює важливість розробки моделей, здатних ефективно працювати в умовах, наближених до реального середовища. Одним із підходів до досягнення цього є включення до навчального набору зображень, зібраних безпосередньо в польових умовах.

Метою цієї роботи є дослідження практичних аспектів навчання згорткових нейронних мереж для задачі класифікації хвороб на зображеннях, отриманих як у контрольованих, так і польових умовах. Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

1. Провести експерименти з архітектурами мереж, методами регуляризації, оптимізаторами та підходами до підготовки й розширення навчальних даних.
2. Оцінити їхній вплив на якість класифікації та обґрунтувати вибір ефективних підходів до побудови стійких моделей для класифікації хвороб рослин.

Використаний набір даних. Враховуючи обмежену здатність моделей, натренованих на стандартизованих наборах, таких як “PlantVillage”, до узагальнення в реальних умовах, особливу увагу приділено використанню більш репрезентативного набору даних. У цій роботі використано об’єднаний набір даних “Plant Disease Classification Merged Dataset” [6], створений шляхом агрегації 14 менших наборів. Він містить понад 79 000 зображень листя рослин, що належать 88 різним класам, кожен з яких відповідає певному виду рослини та її стану – хворобі або здоров’ю. Набір охоплює знімки, зроблені як у лабораторних, так і польових умовах, що робить його більш придатним для навчання моделей, призначених для

практичного застосування. Загальний обсяг даних становить 17.6 ГБ. На рисунку 1 подано приклади зображень із набору даних.

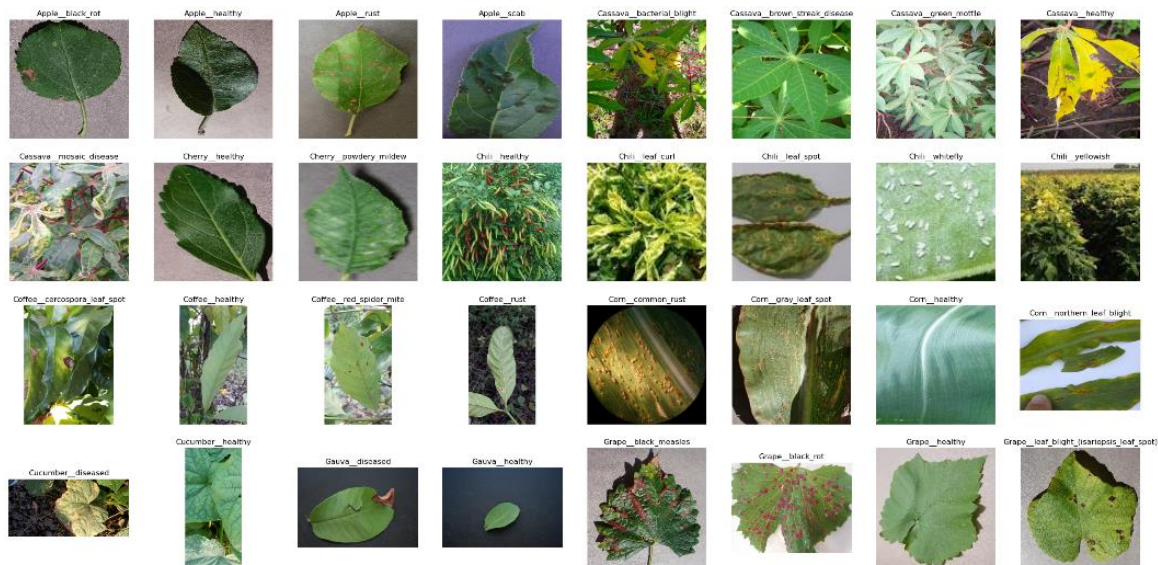


Рис. 1. Зображення з набору даних “Plant Disease Classification Merged Dataset”

Набір даних було поділено на навчальний та тестовий у співвідношенні 80% до 20%.

Ключовою проблемою цього набору даних є значний дисбаланс класів, оскільки деякі категорії (наприклад, певні хвороби чи здорові стани рослин) представлені набагато більшою кількістю зображень, ніж інші. Це може призвести до того, що модель під час навчання надаватиме перевагу домінантним класам, ігноруючи рідкісні, що негативно вплине на загальну точність та надійність класифікації, особливо для менш поширених, але не менш небезпечних хвороб. Для подолання цієї проблеми було застосовано техніки аугментації даних [1, 2]. Слід зауважити, що аугментація дозволила вирішити одразу два важливих завдання. По-перше, вдалося збалансувати кількість зображень у кожному класі, що усунуло проблему дисбалансу та сприяло формуванню моделі, нейтральної до частоти класів. По-друге, аугментовані зображення імітували варіації, характерні для реальних умов зйомки – зміни ракурсу, освітлення, фону, незначні деформації тощо. Таким чином, тренувальний набір було збагачено прикладами, наближеними до польових, що дозволило моделі краще вивчити інваріантні ознаки хвороб і підвищило її здатність до узагальнення. У результаті модель стала більш стійкою до варіативності вхідних даних і краще справлялася з класифікацією в умовах, наближених до реальних.

Аугментація застосовувалася до тренувального набору даних. Вона включала виконання ряду геометричних перетворень, таких як повороти, зсуви, масштабування та віддзеркалення, а також кольорових змін, зокрема зміну яскравості, контрасту та насиченості. Для кожного класу було згенеровано стільки зображень, щоб у підсумку він містив 1000 прикладів. Приклади аугментованих зображень наведено на рисунку 2.

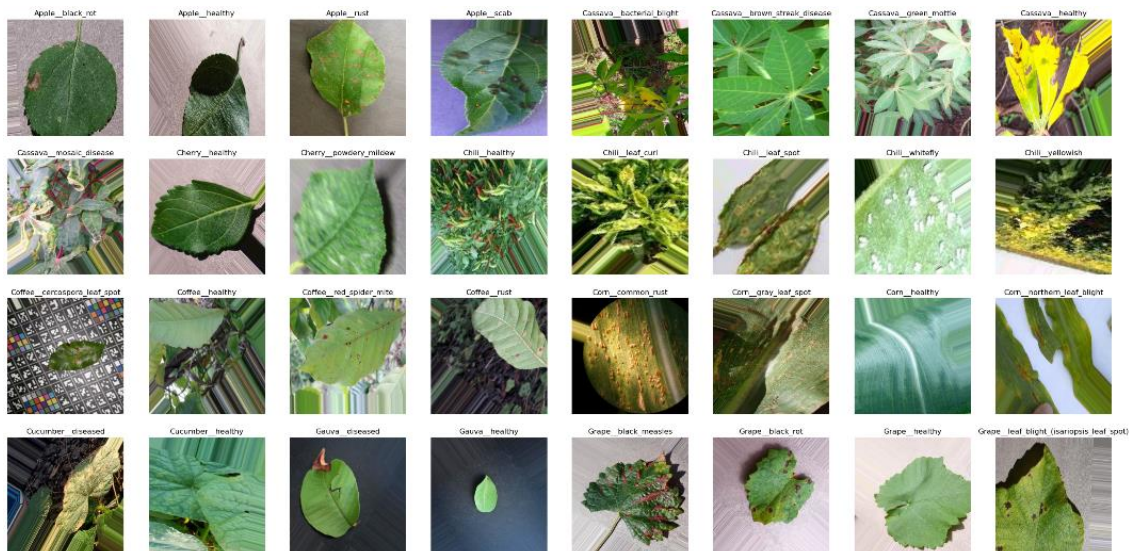


Рис. 2. Зображення, згенеровані внаслідок застосування технік аугментації

У подальших експериментах обсяг тренувального набору поступово збільшувався. Спочатку його було розширено до 2000 зображень на клас, що загалом забезпечило 176 тис. зображень у наборі. В останніх експериментах досягнуто 3000 зображень на клас, що дало в результаті близько 264 тис. зображень. Поступове збільшення обсягу даних шляхом аугментації дозволило дослідити вплив розміру навчальної вибірки на якість класифікації та позитивно вплинуло на точність розпізнавання як поширених, так і рідкісних хвороб.

Результати та їх обговорення. У рамках дослідження було проведено масштабну серію експериментів, спрямованих на вивчення впливу різних конфігурацій архітектури згорткових нейронних мереж та гіперпараметрів на точність класифікації [1, 2]. Загалом було навчено та проаналізовано понад 50 моделей з різними параметрами, що дозволило виявити комбінації, які забезпечують найкращі результати на тестовому наборі даних. Всі моделі було розроблено для обробки зображень розміром 256×256 . Оскільки зображення у наборі даних мали різну роздільну здатність, розмір 256×256 був обраний як компроміс між збереженням достатньої деталізації для розпізнавання симптомів хвороб та зниженням обчислювальних витрат під час навчання моделей. Для всіх моделей було використано категоріальну крос-ентропію як функцію втрат, що є стандартним вибором для задач багатокласової класифікації в контексті глибокого навчання.

У ході експериментів порівнювалися згорткові нейронні мережі з різною глибиною – від одного до шести згорткових блоків у найскладніших архітектурах. Збільшення глибини мережі шляхом додавання згорткових блоків, а також ускладнення структури повнозв'язних шарів, зазвичай, призводило до зростання точності класифікації. Це узгоджується з загальним принципом глибокого навчання, згідно з яким глибші моделі здатні виявляти більш складні й абстрактні ознаки вхідних даних [1]. Однак зі зростанням складності мережі спостерігалось погіршення результатів через надмірне перенавчання: модель починала “запам'ятовувати” навчальні дані, втрачаючи здатність до узагальнення на нових прикладах. Ця проблема є типовою для надмірно глибоких моделей. Найкращий баланс між складністю та продуктивністю демонстрували мережі з чотирма або п'ятьма блоками згорткових шарів. При цьому дуже добре показали себе моделі, в яких перед кожним шаром пулінгу розташовувалося по два згорткових шари. Така конфігурація дозволяла моделі ефективніше вивчати складні просторові патерни до зменшення роздільної здатності зображень унаслідок застосування шару пулінгу.

Розглядалися моделі з кількістю фільтрів у згорткових шарах від 8 до 512, з експоненціальним зростанням на глибших рівнях. Моделі з 512 фільтрами були ефективними, але не завжди перевершували моделі з меншою кількістю фільтрів. Найкращі моделі мали

максимум 128 або 256 фільтрів. В той же час, починати з невеликої кількості фільтрів (8 або 16) також може бути ефективним, особливо в поєднанні з достатньою глибиною. Результати експериментів показали, що надмірна кількість фільтрів може призвести до перенавчання або невиправданого збільшення обчислювальних витрат без суттєвого покращення якості.

У моделях переважно використовувалися ядра розміром 3×3 , але також тестувалися варіанти з ядрами 5×5 на початкових або останніх згорткових шарах. Моделі з ядрами 3×3 стабільно показували найкращі результати, тоді як застосування більших ядер 5×5 не давало значного покращення точності, натомість суттєво збільшувало обчислювальну складність та час навчання моделей. Ядра 3×3 забезпечують мінімальний розмір рецептивного поля, що дозволяє виявляти дрібні деталі, і водночас є обчислювально ефективнішими порівняно з більшими ядрами [1, 2]. Таким чином, експерименти підтвердили, що використання ядер 3×3 забезпечує хороший баланс між здатністю виявляти локальні ознаки та обчислювальною складністю.

У більшості моделей застосовувався MaxPooling2D з вікнами розміру (2,2) або (3,3). У деяких випадках на початкових шарах використовувався AveragePooling2D. MaxPooling2D із розміром вікна 2×2 або 3×3 продемонстрував кращі результати. Заміна MaxPooling на AveragePooling на ранніх шарах призводила до незначного зниження точності. Використання однакового розміру вікна у цих шарах виявлялося ефективнішим за змішані підходи. Для переходу до повнозв'язних шарів використовувався Flatten або GlobalAveragePooling2D (GAP). GlobalAveragePooling2D значно зменшував кількість параметрів порівняно з Flatten і використовувався у більшості успішних моделей. Це пояснюється тим, що GAP виконує глобальне усереднення значень по кожній карті ознак, що зменшує залежність моделі від просторового розташування ознак і знижує ризик перенавчання. Натомість шар Flatten перетворює всі просторові дані в один вектор, зберігаючи повну просторову інформацію, але значно збільшуючи кількість параметрів у наступних повнозв'язних шарах [1, 2].

Кількість повнозв'язних (Dense) шарів змінювалася від одного до трьох, а кількість нейронів у кожному з них – від 128 до 2048. Найкращі результати продемонстрували моделі з одним або двома великими Dense шарами (наприклад, один шар із 2048 нейронами) або трьома меншими (наприклад, 1024–512–256). Зменшення кількості Dense шарів з трьох до одного не призводило до значного погіршення точності, що дозволяє спростити архітектуру без значних втрат якості. Водночас надмірне збільшення повнозв'язної частини спричиняло перенавчання. Після шару глобального усереднення ознак (GAP) зазвичай достатньо одного або двох повнозв'язних шарів. При цьому важливо застосовувати Dropout для регуляризації цих шарів.

Основною функцією активацією була ReLU; у деяких конфігураціях застосовувалася також LeakyReLU. ReLU показала себе як стабільне та ефективне рішення, тоді як LeakyReLU не продемонструвала переваг у проведених експериментах. Для фінального шару завжди використовувалася Softmax-активація з метою багатокласової класифікації.

Dropout застосовувався після Dense шарів з коефіцієнтами від 0.3 до 0.8. Цей механізм випадковим чином “вимикає” частину нейронів під час навчання, змушуючи мережу формувати більш робастні ознаки й зменшуючи залежність від окремих нейронів [1, 2]. Додавання Dropout стабільно покращувало результати порівняно з моделями без нього. Водночас надто високі значення коефіцієнта не призводили до переваг. У проведених експериментах використання Dropout з коефіцієнтом 0.3–0.5 після повнозв'язних шарів зарекомендувало себе як ефективна техніка регуляризації для боротьби з перенавчанням.

SpatialDropout2D застосовувався після згорткових або пулінгових шарів з коефіцієнтами від 0.05 до 0.3. На відміну від звичайного Dropout, SpatialDropout2D вимикає цілі карти ознак, що є ефективнішим для регуляризації згорткових шарів, оскільки сусідні пікселі в картах ознак часто сильно корелюють. Додавання SpatialDropout, особливо з невеликими коефіцієнтами, показало позитивний вплив на точність та стабільність навчання у багатьох моделях. Занадто високі значення SpatialDropout2D (понад 0.25), погіршували

збіжність та точність моделей. Таким чином, SpatialDropout2D рекомендується застосовувати після пулінгових шарів або між згортковими шарами з коефіцієнтом 0.05-0.2.

Batch Normalization додавалася після згорткових та перед повнозв'язними шарами. Нормалізація виходів кожного шару допомагає боротися з проблемою внутрішнього коваріантного зсуву (internal covariate shift), коли розподіл вхідних даних шару змінюється під час навчання, що ускладнює оптимізацію [1, 2]. У даній роботі вона значно покращила стабільність навчання та кінцеву точність моделей. Моделі з Batch Normalization досягали вищої точності та швидше збігалися. Використання Batch Normalization після загорткових та перед повнозв'язними шарами є важливим для навчання глибоких CNN, оскільки дозволяє стабілізувати розподіл активацій та прискорити навчання. Крім того, використання Batch Normalization було ефективнішим при вимкненому зсуві (`use_bias=False`) у попередніх згорткових шарах.

L2-регуляризація застосовувалася до згорткових та/або повнозв'язних шарів з невеликими коефіцієнтами (0.0001 або 0.0005). У поєднанні з Batch Normalization та Dropout, L2-регуляризація сприяла незначному підвищенню стабільності тренування. L2-регуляризація може бути корисною як додатковий інструмент боротьби з перенавчанням, додаючи штраф за великі значення ваг до функції втрат.

У якості оптимізаторів порівнювалися Adam та SGD з імпульсом (momentum), а також тестувався SGD із Nesterov momentum. На початкових етапах оптимізатор Adam продемонстрував хорошу продуктивність із типовими параметрами. Проте для досягнення вищої точності на складніших моделях ефективнішим виявився оптимізатор SGD з високим імпульсом (0.9–0.95) у комбінації зі CosineDecay. Було встановлено, що SGD з імпульсом здатен знаходити кращі локальні мінімуми, ніж Adam, особливо на фінальних етапах навчання, хоча може збігатися повільніше на початку [2].

У дослідженні застосовувалися як фіксовані низькі значення швидкості навчання (learning rate, LR) – 0.0001 для оптимізатора Adam та 0.0007 для SGD, – так і адаптивні стратегії зміни LR, зокрема ReduceLROnPlateau та CosineDecay. У випадку CosineDecay початкове значення швидкості навчання встановлювалося на відносно високому рівні (0.007 або 0.01). Використання схем динамічної зміни LR виявилось важливим для ефективного тренування моделей. Зокрема, ReduceLROnPlateau забезпечував поступове зниження LR при плато, тоді як CosineDecay, за умови старту з вищого LR, також демонстрував високу ефективність у випадку найкращих моделей. На основі отриманих результатів рекомендується застосовувати стратегію зміни швидкості навчання CosineDecay зі стартовим LR близько $1e-2$ або $7e-3$ та оптимізатор SGD з високим значенням імпульсу.

В якості розміру пакета (batch size) використовувалися значення 8, 16 та 32. Зменшення batch size з 32 до 8 дозволило тренувати складніші моделі завдяки кращому узагальненню та досягати високої точності, але значно збільшило час навчання. Менші розміри пакетів, 8 або 16, можуть покращити узагальнення, але потребують більше часу на тренування. Вибір оптимального значення залежить від апаратних обмежень та прийнятного часу навчання. Batch Size 16 є хорошим компромісом, що забезпечує баланс між швидкістю тренування і стабільністю оновлення ваг.

Кількість епох варіювалася від 20 до 100. EarlyStopping використовувався у більшості пізніх експериментів для зупинки навчання при відсутності покращення. EarlyStopping ефективно запобігав перенавчанням та економив час, часто зупиняючи навчання значно раніше максимальної кількості епох.

Обсяг тренувальних даних поступово збільшувався шляхом аугментації: від 1000 зображень на клас у початкових моделях до 2000, а згодом – до 3000 у фінальних версіях. Розширення набору даних суттєво покращило як загальну точність моделей, так і стабільність процесу навчання. Перехід від 2000 до 3000 зображень на клас дозволив досягти найкращих результатів. Для задач класифікації, що передбачають велику кількість класів та високу варіативність даних, використання великого та різноманітного, поповненого за допомогою аугментації, набору даних є важливим фактором успіху [1, 2].

Найвищу точність на тестовому наборі даних, близько 94.7%, продемонструвала модель № 51, яка є однією з понад 50 навчених моделей. Її архітектура складалася з п'яти блоків подвійних згорткових шарів із кількістю фільтрів 16, 32, 64, 128 і 256 відповідно, ядрами 3×3, функцією активації ReLU та нормалізацією пакетів. Після кожного з перших чотирьох блоків застосовувалися шари MaxPooling2D (2×2 або 3×3) і SpatialDropout2D із поступовим збільшенням коефіцієнта від 0.05 до 0.2. Після останнього згорткового шару використовувався GlobalAveragePooling2D. Класифікаційна частина включала Batch Normalization, шар Dropout (0.2), повнозв'язний шар Dense (2048 нейронів, ReLU, L2-регуляризація з параметром 0.0005), шар Dropout (0.5) та вихідний шар Dense на 88 класів із softmax. Архітектуру моделі схематично зображено на рисунку 3.

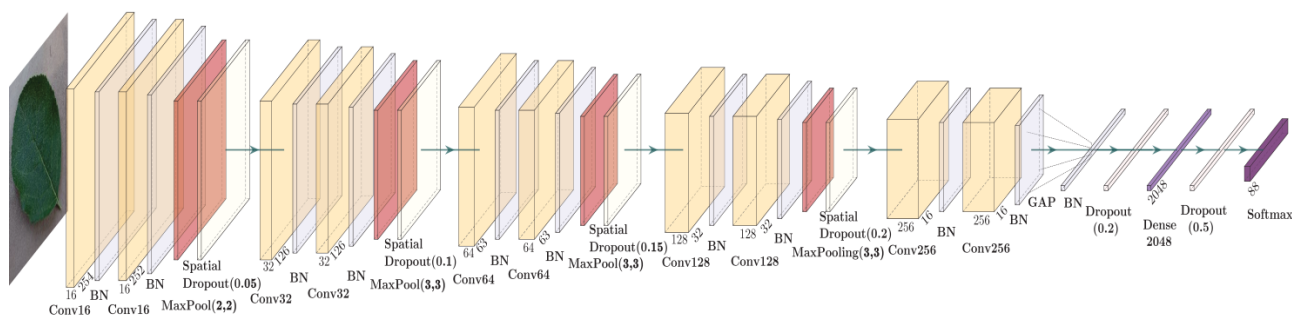


Рис. 3. Архітектура моделі № 51, яка показала найвищу точність під час експериментів

Навчання цієї моделі здійснювалося оптимізатором SGD з імпульсом 0.9 та регулюванням швидкості за схемою CosineDecay (початкова швидкість 0.01, мінімальна – 10^{-8}). Модель навчалася пакетами по 16 зображень протягом 50 епох на аугментованому наборі з 3000 зображень на клас. На рисунку 4 подано графіки точності та втрат моделі на навчальній та тестовій вибірках під час навчання.

Також слід відзначити, що модель № 51 не лише продемонструвала найвищу точність (accuracy) – 0.947, але й досягла високих показників за іншими ключовими метриками класифікації. Зокрема, влучність (precision) становила 0.901, повнота (recall) – 0.92, а F1-міра склала 0.908, що свідчить про хороший баланс між влучністю та повнотою. Отримані результати підтверджують ефективність розробленої моделі для вирішення задачі класифікації хвороб рослин.

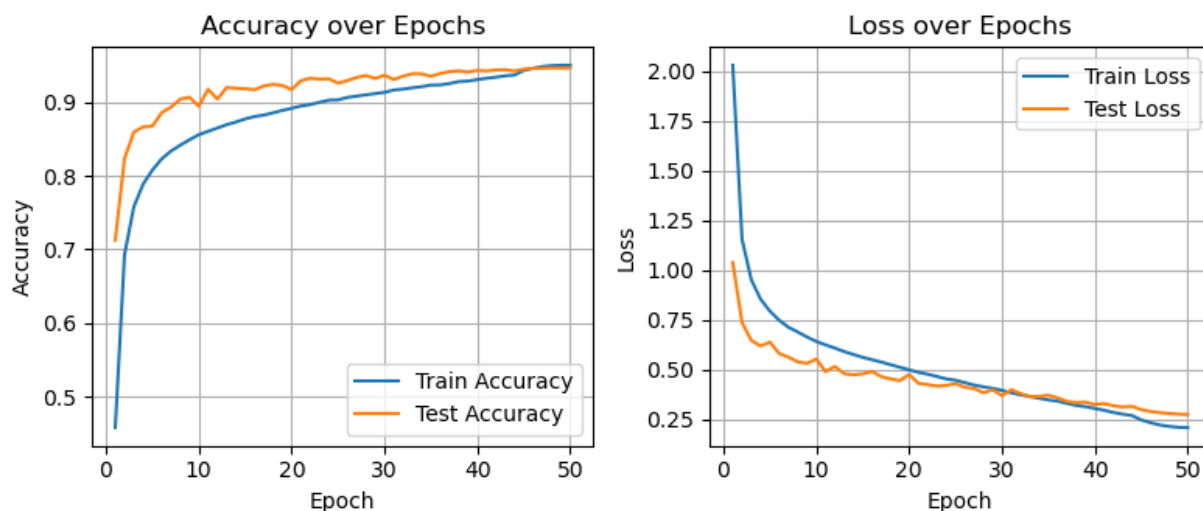


Рис. 4. Графіки точності та функції втрат моделі № 51

Висновки. У цій роботі було досліджено практичні аспекти побудови та навчання згорткових нейронних мереж (CNN) для задачі багатокласової класифікації хвороб рослин за зображеннями, зібраними як у лабораторних, так і в польових умовах. Використано набір даних “Plant Disease Classification Merged Dataset”, до якого застосовано техніки аугментації для подолання дисбалансу класів та збільшення обсягу тренувального набору.

Проведено масштабну серію експериментів із різними конфігураціями архітектур CNN, гіперпараметрами та методами регуляризації, що дозволило виявити комбінації, які забезпечують найкращі результати. Загалом було навчено і протестовано понад 50 моделей; найкраща з них досягла точності близько 94.7% на тестовому наборі.

За результатами проведених експериментів оптимальною виявилася архітектура з чотирма або п'ятьма блоками парних згорткових шарів (із фільтрами розміром 3×3), використанням MaxPooling та GlobalAveragePooling перед повнозв'язною частиною. Ефективною стратегією є початкове використання невеликої кількості фільтрів (16) з поступовим її збільшенням на глибших рівнях. Комбіноване застосування Batch Normalization, Dropout (0.3–0.5 для повнозв'язних шарів) та SpatialDropout2D (0.05–0.2 для згорткових блоків, зі зростанням коефіцієнта з глибиною) сприяє стабілізації навчання та зменшенню перенавчання. Оптимізатор SGD з високим імпульсом (0.9) у поєднанні з розкладом швидкості навчання CosineDecay (з початковою швидкістю навчання ~ 0.01) продемонстрував здатність забезпечувати високу точність та стабільну збіжність. Розмір пакета 16 виявився оптимальним з огляду на баланс між точністю, стабільністю та часом навчання. Крім того, збільшення обсягу тренувальних даних за допомогою аугментації суттєво покращує якість класифікації.

Отримані результати демонструють високий потенціал методів глибокого навчання для автоматизованої діагностики хвороб рослин та можуть бути використані як практичні рекомендації при розробці подібних моделей в аграрному секторі та інших галузях.

1. Goodfellow, I. Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
2. Rosebrock, A. (2017). *Deep learning for computer vision with python*. PyImageSearch.
3. Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
4. Too, E. C., Yujian, L., Njuki, S., & Yingchun, L. (2019). A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.032>
5. Falaschetti, L., Manoni, L., Leo, D. D., Pau, D., Tomaselli, V., & Turchetti, C. (2022). A CNN-based image detector for plant leaf diseases classification. *HardwareX*, 12, e00363. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00363>
6. Dobrovsky, A. (2023). *Plant Disease Classification Merged Dataset* [Dataset]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/alinedobrovsky/plant-disease-classification-merged-dataset>

ЕКОІНДУСТРІАЛЬНІ ПАРКИ ЯК МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В УКРАЇНІ

Щербан Ореста

Національний університет «Львівська політехніка»,

Львів, Україна

oresta.y.shcherban@lpnu.ua

Цубов Леонід

Національний університет «Львівська політехніка»,

Львів, Україна

leonid.v.tsubov@lpnu.ua

Квасній Любов

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,

Дрогобич, Україна

lg_k@ukr.net

У статті розглядаються ключові аспекти та процес переходу України від лінійної моделі економіки до циркулярної економіки на основі державних проєктів і з урахуванням змін, спричинених війною. Основним методом переходу до економіки замкненого циклу є створення екоіндустріальних парків або переорієнтація вже існуючих індустріальних парків і підприємств відповідно до принципів циркулярної та зеленої економіки з залученням інноваційних технологій та методів. Метою наукового дослідження процесу створення індустріальних парків є покращення екологічної, економічної та соціальної нестабільної ситуації в країні. Автори запропонували принципи відбору промислових підприємств на територіях індустріальних парків з урахуванням індустріального симбіозу, що обумовлено активним переміщенням промислових компаній України із зони бойових дій.

Ключові слова: циркулярна економіка; індустріальний симбіоз; екоіндустріальні парки; екологічне управління

The article explores the key aspects and the process of Ukraine's transition from a linear economic model to a circular economy, based on government projects and considering the changes caused by the war. The primary method for transitioning to a closed-loop economy is the creation of eco-industrial parks or the reorientation of existing industrial parks and enterprises according to the principles of circular and green economies, incorporating innovative technologies and methods.

The scientific aim of studying the creation of industrial parks is to improve the country's unstable environmental, economic, and social conditions. The authors propose principles for selecting industrial enterprises within industrial parks, taking into account industrial symbiosis—an approach prompted by the active relocation of Ukrainian industrial companies from conflict zones.

Keywords: circular economy; industrial symbiosis; eco-industrial parks; environmental management

З огляду на погіршення екологічної ситуації в Україні та в усьому світі, у межах державної програми, що була започаткована ще до війни, а також руйнівні зміни, пов'язані з війною, необхідно впроваджувати прогресивні механізми відновлення. Зокрема, стимулювання залучення інвестицій на відновлення, релокацію підприємств до західних регіонів, залучення європейських компаній до співпраці з метою якнайшвидшого вступу України до Європейського Союзу після закінчення війни. У цьому випадку створення, будівництво та впровадження індустріальних парків є єдино правильним рішенням.

На основі досвіду розвинених західних країн [1; 2; 3], зазначимо, що екоіндустріальні парки є основою циркулярної економіки — саме в них здійснюється переробка відходів і їх залучення до вторинного обігу. Тому створення екоіндустріальних парків в Україні є найоптимальнішим методом переходу від лінійної економіки до циркулярної.

З огляду на розвиток ЕП в Україні, насамперед варто звернути увагу на наявні індустріальні парки. Слід зазначити, що у 2019 році в Україні розпочалася програма впровадження екоіндустріальних парків. У межах Глобальної програми екоіндустріальних парків було відібрано існуючі індустріальні парки, які демонстрували найвищий потенціал для трансформації в ЕП. Відбір парків здійснювався на основі економічних, екологічних та соціальних показників підприємств-учасників.

За результатами оцінки відповідності для співпраці було обрано три парки: «Білоцерківський вантажно-авіаційний комплекс» («БВАК», м. Біла Церква) — отримав найвищу оцінку і показав найвищий потенціал для трансформації в ЕП; «Агромаш» (м. Запоріжжя) та «Патріот» (м. Суми) — невеликі індустріальні парки, які також були обрані та отримали допомогу в розвитку (згідно зі звітом про досягнення Geipp-Ukraine)[4].

Проект сприяв оцінці ресурсоефективності та чистого виробництва для резидентів БВАК. У результаті запропонованої оптимізації виробничих процесів передбачено зменшення споживання електроенергії на 15%, природного газу — на 20%, твердого палива — на 17%, а води — на 12%. Щорічне скорочення викидів вуглекислого газу завдяки впровадженню інноваційних змін у виробництві становить 365,27 тонн CO₂-еквіваленту на рік, а фінансова економія — 67 418 євро на рік [4].

Збройний конфлікт, що почався 24 лютого 2022 року, спричинив регресивний стан економіки — зниження виробництва та зростання інфляції. У квітні 2022 року уряд України створив Національну раду з відновлення України від наслідків війни та розпочав планування повоєнного розвитку країни з акцентом на економічну реконструкцію. У цьому контексті розвиток та впровадження ЕП залишаються пріоритетним напрямком. З квітня 2022 року в рамках Національної програми підтримки бізнесу та розвитку ЕП Міністерство економіки сприяє релокації екоіндустріальних парків та окремих підприємств із зон активних бойових дій у безпечніші регіони Західної України.

Методом ідентифікації та картографування, за допомогою інтерактивної карти складу та спеціалізації підприємств, розташованих на відповідних територіях, здійснюється поступове перенесення підприємств та ЕП. Такий підхід дає змогу максимально розвивати індустріальний симбіоз і забезпечити найбільш зручне розташування переміщених підприємств для створення екоіндустріальних парків [5].

Однією з цілей нашої роботи було вивчення етапів створення індустріальних парків у Львівській області з метою можливої подальшої наукової та дослідницької співпраці. Стратегічне планування розвитку Львівської області на період 2021–2027 років передбачає розвиток індустріальної інфраструктури, підтримку підприємництва, створення кластерів та індустріальних парків.

Отже, у Львівській області налічується десять індустріальних парків [4], які перебувають на етапі проектування, планування, будівництва та реалізації:

Індустріальний парк «Рясне-2» (Львів) — включений до Реєстру індустріальних парків 7 лютого 2014 року. Ініціатор створення — Львівська міська рада. Компанія-управитель — ТОВ «СітіПарк Львів» (група компаній «Драгон Капітал», Кіпр). Площа — 23,94 га. Планується розміщення 15 виробничих, складських та логістичних об'єктів. Передбачається створення 12 000 робочих місць та інвестиції на суму 100 млн доларів США.

Яворівський індустріальний парк — зареєстрований 26 квітня 2017 року. Ініціатор — Яворівська районна рада. Площа — 40 га. Планується залучення підприємств інструментобудування, машинобудування, металообробки, логістики. Часткове фінансування з держбюджету, більшість інвестицій — від приватних інвесторів.

Новороздільський індустріальний парк — зареєстрований 15 червня 2017 року. Ініціатор — Новояворівська міська рада. Площа — 46,4 га. Орієнтований на екологічно чисте виробництво за принципами циркулярної економіки. Планується створення 1150 робочих місць. Фінансується державою, триває пошук інвесторів.

Індустріальний парк «Сігма Парк Яричів» — зареєстрований 4 вересня 2017 року. Ініціатор — ТОВ «Індустріальний парк — Сігма Парк Яричів». Площа — 15,7 га. Створюється з

нуля. Передбачено створення до 2500 робочих місць. Залучаються підприємства з інших регіонів України та іноземні інвестори.

Індустріальний парк «Захід Ресурс» (м. Городок) — зареєстрований 19 вересня 2018 року. Площа – 20,77 га. Напрямки діяльності: харчова промисловість, легка промисловість, деревообробка, машинобудування, логістика. Планується створити 1625 робочих місць. Фінансування змішане.

Індустріальний парк «Бізнес Прайм» (с. Тернопілля) — зареєстрований 19 серпня 2019 року. Ініціатор – ТОВ «Рубікон Трейд». Площа – 17,5 га. Напрямки: харчова, легка, деревообробна промисловість, машинобудування. Заплановано створення 1750 робочих місць. Ведуться підготовчі роботи.

Індустріальний парк «Sparrow Park Lviv» — зареєстрований 14 травня 2021 року. Ініціатор – ТОВ «Sparrow Industries». Площа – 18,82 га в промзоні «Сигнівка» у Львові. Планується створити 1000 робочих місць. Фінансується з власних та інвестиційних коштів. Напрями – машинобудування, логістика, харчова та легка промисловість.

Індустріальний парк «Мостиський Сухий Порт» — зареєстрований 2 серпня 2021 року. Ініціатор – Мостиська міська рада. Площа – 34,5 га. Напрями: будматеріали, меблі, логістика, машинобудування. Планується створення 1150 робочих місць. Фінансування – державне, місцеве та приватне.

Еко-смайт індустріальний парк «ГАЛІТ» (м. Дрогобич) — зареєстрований 11 листопада 2022 року. Ініціатор – Дрогобицька міська рада, управитель – ТОВ «YETI PRO». Площа – 19 га. Планується будівництво сучасної інфраструктури: сонячні панелі, насоси, генератори. Напрями: ІТ, меблева, хімічна, машинобудівна, легка промисловість.

Розвиток індустріальної інфраструктури Львівщини триває. Впроваджуються інноваційні технології відповідно до міжнародних стандартів, залучаються підприємства за принципами циркулярної економіки. Це створює перспективи для наукової співпраці, інвестування та сталого регіонального розвитку.

Науковці наголошують на уповільненні впровадження раціонального природокористування в Україні, що створює додаткові фактори ризику для населення та погіршує якість життя за умов низького рівня реалізації екотехнологій [6].

Враховуючи екологічну ситуацію в світі загалом та на території України зокрема, в межах глобальної та державної політики у сфері охорони навколишнього середовища [7;8;9], екологічної безпеки, охорони та управління землями, ми пропонуємо практичні рекомендації щодо впровадження зеленої економіки (таблиця 1).

Таблиця 1

Практичні рекомендації щодо впровадження зеленої економіки

№	Практичні рекомендації щодо впровадження зеленої економіки
1	Виділити та законодавчо закріпити нову категорію лісів – клімато- та водорегульовальні ліси (лісові території, не порушені або слабо порушені господарською діяльністю, які виконують клімато- та водорегульовальну функцію), до яких не застосовується поняття поновлюваного ресурсу (із відновленням притаманного біорізноманіття та функціонального механізму підтримки життєздатності флори і фауни);
2	Розробити стратегію розвитку лісового комплексу з урахуванням принципової відмінності між кліматоохоронними лісами, які підлягають виключно охороні та моніторингу й повністю виключені з будь-якої господарської діяльності, та експлуатаційними лісами як поновлюваним ресурсом;
3	Застосовувати інструменти циркулярної економіки у лісовій та деревообробній промисловості виключно в експлуатаційних лісах (вже порушених господарською діяльністю та інтенсивно створених лісових плантаціях);

4	Створювати технології штучного та комбінованого вирощування лісових плантацій (за прикладом Швеції та Фінляндії) для отримання максимального економічного ефекту (зокрема, впроваджувати інтенсивне лісове господарство з урахуванням новітніх біотехнологій);
5	Використовувати природоподібні технології (з оцінкою стабілізаційного потенціалу та збереженням природних екосистем);
6	Поступово впроваджувати спільне використання "зелених" фінансів ("зелені" облігації, "зелена" криптовалюта, "зелені" кредити та рахунки) в механізмі циркулярної економіки, включаючи розміщення "зелених" облігацій на фінансових ринках ЄС.

Особливістю екоіндустріальних парків є ресурсоефективне та чисте виробництво, що поєднує найкращі практики у сферах чистого виробництва, екологічної ефективності, управління відходами та запобігання забрудненню. Під ресурсоефективним і чистим виробництвом мається на увазі підхід до раціонального використання природних ресурсів (матеріалів, води та енергії) і зменшення відходів та викидів в атмосферу [10;11].

Ресурсоефективне та чисте виробництво охоплює три основні напрями сталого розвитку:

- ефективність виробництва: оптимізація продуктивного використання природних ресурсів (матеріалів, енергії та води);
- екологічне управління: мінімізація впливу на довкілля та природу шляхом скорочення кількості відходів і викидів;
- людський розвиток: зниження ризиків для людей і громад, підтримка їх розвитку.

Інструментарій охоплює всі ключові компоненти екоіндустріальних парків, розвиток індустріальної симбіозу, управління парками, політичну підтримку, підвищення потенціалу тощо.

ЕІП призначено для:

- індустріальних парків у різних міжнародних контекстах, особливо у країнах, що розвиваються або з перехідною економікою;
- всіх етапів розвитку індустріальних парків: від планування до експлуатації;
- парків із різними характеристиками (типи галузей, розміри, рівень технологій, моделі управління).

Індустріальні парки повинні не тільки гарантувати базові права працівників, а й забезпечувати високі стандарти добробуту, аби залучати найкращі кадри та формувати економіку знань.

Оскільки індустріальні парки — це проєкти на перетині інфраструктури та нерухомості, вони мають справу з низкою ризиків:

- коливання валютного курсу;
- відсоткові ставки за кредитами;
- вплив кризових ситуацій на фінансові ринки;
- дефіцит коштів тощо[12;13].

Найефективніший підхід — це управління ризиками за участі фінансових консультантів і міжнародного досвіду. Обираючи стратегію контролю, слід враховувати характер, тип і витрати, пов'язані з ризиками (Таблиця 2).

Таблиця 2

Стратегії управління найпоширенішими ризиками в індустріальних парках

Стратегія	Зміст стратегії
Управління ризиками в сфері енергозабезпечення	Проведення ретельного аналізу загальних енергетичних потреб підприємств, наявних енергоресурсів та можливостей місцевої мережі. Проектування та забезпечення альтернативних джерел енергії, а також аварійних систем енергопостачання сприятимуть надійному та безперебійному енергозабезпеченню парку.
Управління ризиками у сфері персоналу	Організація та впровадження стимулів для працівників, таких як безкоштовне транспортування, програми професійного розвитку тощо.
Управління ризиками у сфері земельних відносин	Девелопери індустріальних парків повинні ретельно оцінити всі ризики (правовий статус земельної ділянки, соціальні проблеми, висока вартість тощо) у сфері земельних відносин до початку будівництва.
Управління екологічними ризиками	Надзвичайно важливим є впровадження якісної стратегії та системи екологічного управління (наприклад, використання систем моніторингу в реальному часі в індустріальних парках дозволяє своєчасно збирати дані про безпеку на робочому місці та ефективніше запобігати загрозам).

Управлінські рішення повинні враховувати три складові сталого розвитку: соціальну, економічну та екологічну. Відповідно, парки повинні впроваджувати системи моніторингу згідно з міжнародними стандартами.

Регулярні енергоаудити, сприяння в переході на відновлювані джерела енергії, підтримка впровадження систем екологічного управління — усе це необхідні складові сталого розвитку індустріальних парків. На державному рівні слід розробити програми постійної підтримки й модернізації індустріальної інфраструктури з опорою на міжнародний досвід.

Зазначимо, що керівна компанія парку повинна затвердити та постійно контролювати виконання плану управління відходами під час експлуатації парку. Керівництво парку має стимулювати запобігання утворенню відходів, повторне використання, відновлення та переробку матеріалів шляхом впровадження програм чистого виробництва, ресурсоефективності, обміну матеріалами та промислової симбіозу.

Парки повинні мати інфраструктуру та технології для обробки та утилізації відходів, що утворюються внаслідок діяльності резидентів (відповідно до типу відходів), а також для забезпечення стандартів скиду стічних вод у спільні очисні споруди. Керівна компанія повинна співпрацювати з місцевим самоврядуванням для впровадження низьковуглецевих технологій та контролю викидів парникових газів.

Управління відходами в індустріальному парку починається з розробки комплексного плану, зокрема, направлення відходів до централізованого центру управління. Наявність таких центрів у кожному регіоні дозволяє вирішити проблему утилізації для багатьох парків та підприємств, які не мають власного обладнання.

Традиційні стратегії управління відходами повинні ґрунтуватися на таких принципах:

- зменшення утворення небезпечних речовин на джерелі виникнення шляхом модернізації систем та зміни матеріалів;

- повторне використання продукту у первісному чи зміненому вигляді, наприклад, після очищення стічних вод або хімікатів;
- сортування та переробка на підприємстві чи в загальному центрі, з подальшим повторним використанням;
- вилучення сировини для подальшого застосування в рамках обміну між підприємствами-виробниками відходів і тими, хто їх використовує;
- обробка спеціальними технологіями з метою зменшення об'єму, ваги чи токсичності перед утилізацією.

Багато підприємств, створених у пострадянський період, не були обладнані установками для переробки відходів як вторинної сировини. Перехід до циркулярної моделі вимагає вирішення цього питання.

З огляду на погіршення екологічної ситуації в Україні через накопичення різних видів відходів і фінансові труднощі для запуску власних ліній переробки, ми рекомендуємо звертатися до послуг спеціалізованих компаній. Одним із перспективних рішень для очищення стічних вод і утилізації осадів є використання технологічного комплексу (роторно-хвильовий реактор), у якому відбуваються фізико-хімічні процеси очищення. В результаті очищення досягаються: руйнування клітинних мембран забруднюючих речовин, зневоднення, дезінфекція та формування нетоксичних сполук, що дозволяє повторно використовувати очищену воду та осад.

Економічний ефект — це отримання вторинних ресурсів, які мають товарну цінність і можуть використовуватись у сільському господарстві, промисловості, енергетиці та будівництві.

Отже, впровадження системи циркулярної економіки в Україні має забезпечити такі результати: оптимізацію діяльності суб'єктів господарювання, пошук раціональних методів використання ресурсів; забезпечення замкненого циклу виробництва продукції з метою ефективного використання наявних потужностей; підтримання темпів економічного зростання; розвиток інших секторів економіки в аспекті поповнення природних ресурсів, зростання обсягів ВВП, розширення ринку праці.

Стратегія екологічної безпеки України передбачає такі основні завдання: ефективне використання природних ресурсів; підвищення рівня утилізації відходів виробництва та споживання; розвиток системи ефективного управління відходами; створення системи переробки в промисловості, зокрема повторне використання таких відходів; стимулювання впровадження найкращих наявних інноваційних технологій; підтримка та регулювання програм на державному рівні; залучення інвестицій; розвиток наукових досліджень та співпраці, а також низка інших завдань.

Кінцевою метою «зеленої» політики, є модель суспільства, в якому всі ресурси (корисні копалини, енергія, вода) використовуються настільки ефективно, що саме поняття «відходи» зникає. Економіка починає функціонувати в межах концепції Zerowaste («нуль відходів»). У цьому контексті саме еко-індустріальні парки є інструментом стимулювання екологічно чистого промислового виробництва, залучення інвестицій, підвищення рівня зайнятості населення, вирівнювання рівня економічного розвитку окремих територій, регіонів і країни в цілому. Великі надії покладаються на функціонування індустріальних парків в Україні, оскільки вони вважаються найефективнішим заходом економічного зростання. Для підвищення ефективності функціонування еко-індустріальних парків в Україні необхідно запровадити пакет фіскальних стимулів із паралельними змінами до Податкового кодексу України для учасників індустріальних парків, враховуючи, що чим бідніша територія — тим більший обсяг державної допомоги має бути наданий учасникам індустріальних парків.

Підсумовуючи, варто сказати, що формування багаторівневої мережі еко-індустріальних парків в Україні дозволить реалізувати політику інноваційного розвитку регіонів країни в напрямках: ресурсозбереження (переробка відходів для максимального залучення вторинних ресурсів в економічний обіг, заміна невідновлюваних природних

ресурсів вторинними та збереження стратегічного потенціалу: лісів, джерел питної води, цінних корисних копалин тощо) з одночасним відновленням, розвитком і розширенням вітчизняної машинобудівної та технологічної бази на основі інноваційних технологій, забезпечення екологічної безпеки та охорони навколишнього природного середовища, розвиток підприємницької діяльності, зростання бюджетних надходжень, продуктивності праці, підвищення науково-технічного потенціалу та підготовка кваліфікованих інженерно-технічних кадрів.

Таким чином, концепція еко-індустріального підходу поєднує інтереси промислового розвитку, соціально-економічного зростання та охорони навколишнього природного середовища. Саме створення, впровадження та реалізація еко-індустріального розвитку України сприятиме переходу країни від лінійної моделі економіки до моделі замкненого циклу, заснованої на принципах екологічного захисту.

1. GEIPP-Ukraine. (2020). Глобальна програма еко-індустріальних парків в Україні: реалізація на місцевому рівні. URL: <https://geipp-ukraine.org/>

2. Гурочкіна В. В., Будзинська М. С.(2020). Циркулярна економіка: українські реалії та можливості для промислових підприємств. Економічний вісник. Серія: фінанси, облік, оподаткування, 5, 52–64. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ehsfat_2020_5_7

3.Румянцева, Г. І.(2017). Функціонування індустріальних парків в Україні в контексті світового досвіду. Матеріали Дванадцятій Всеукраїнської науково-практичної конференції «Економічні, правові, гуманітарні, соціальні, екологічні проблеми розвитку у XXI столітті: вітчизняні та світові реалії» Нововолинськ: Бізнес-Інтернет-центр. 46–64.

4.GEIPP-Ukraine. . Еко-індустріальні парки – звіт про досягнення. Електронний ресурс. URL: <https://geipp-ukraine.org/biblioteka/>

5. Міністерство економіки України. Модель еко-індустріального парку в Україні.

URL:<https://www.me.gov.ua/Documents/Detail/ModelEkoindustrialnogParkuVUkraine>

6.Коваль В., Міхно І., Удовиченко І., Гордійчук Ю., Каліна І.(2021). Сталий менеджмент природних ресурсів для забезпечення стратегічного екологічного розвитку. TEM Journal, 10(3),1022–1030.

7.Downey, H., Amano, T., Cadotte, M., Cook, C. (2021). Training future generations to deliver evidence-based conservation and ecosystem management. Ecological Solutions and Evidence, 2(1): URL: <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12032>

8.Данкевич А., Сосновська О., Добрянська Н., Ніколенко Л., Мазур Ю., Інгрем К. (2021)Еколого-економічне управління інноваційною діяльністю підприємств. Науковий вісник Національного гірничого університету, 5,118–124. URL:<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/118>

9.Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., Vazquez-Brust, D., Yakovleva, N., (2021). Circular economy, degrowth and green growth as pathways for research on sustainable development goals: a global analysis and future agenda. Ecol. Econ. 185, 107050, URL:<https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.107050>

10.Kristensen, H. S., Mosgaard, M. A., (2020). A review of micro level indicators for a circular economy–moving away from the three dimensions of sustainability? J. Clean. Prod. 243, 118531, URL:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>

11.Habib, M. A., Bao, Y., Nabi, N., Dulal, M., Asha, A. A., Islam M., (2021). Impact of strategic orientations on the implementation of green supply chain management practices and sustainable firm performance. Sustainability. 13, 340, URL:<https://doi.org/10.3390/su13010340>

12. Бондаренко С., Шлафман Н., Купріна Н., Каламан О., Моравська О., Цуркан Н. (2021). Планування, облік і контроль як інструменти управління ризиками для інвестиційних проєктів малого бізнесу. Emerging Science Journal, 5(5), 650–665.URL: www.ijournalse.org

13.Fainmesser, I. P., Galeotti, A., (2020). Pricing Network Effects: Competition. American Economic Journal: Microeconomics, 12 (3), 1–32.URL: <https://doi.10.1257/mic.20170226>

ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

Колективна монографія

Опублікована за результатами II Міжнародної науково-практичної конференції
«Інформаційні технології у сфері захисту довкілля»

Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/uk/itep-2025>

Відповідальний за випуск – Андрій Лагун

Видавець і виготівник:
СПДФ Омельченко В.
м. Львів, Козельницька, 4

