

УДК 504.064:502.131.1:504.05(477.85)

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЛЬВІВЩИНИ ЯК КЛЮЧОВИЙ ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНУ ТА МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

М. Іванків¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4911-2877

Н. Качмар¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0003-4471-5895

Т. Дацко¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-2957-1822

А. Дидів¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4436-9008

В. Бальковський¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-3995-1909

І. Городиська², к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-1580-3450

¹Львівський національний університет природокористування²Інститут агроекології і природокористування НААН України

<https://doi.org/10.31734/agronomy2025.29.030>

Іванків М., Качмар Н., Дацко Т., Дидів А., Бальковський В., Городиська І. Екологічний моніторинг Львівщини як ключовий інструмент забезпечення сталого розвитку регіону та мінімізації екологічних ризиків

У статті розглянуто значення екологічного моніторингу як фундаментальної складової забезпечення сталого розвитку, зокрема в контексті Львівської області. Зауважено, що в сучасних умовах кліматичних змін і зростаючого антропогенного навантаження на навколишнє середовище, впровадження цифрових технологій у систему екологічного моніторингу Львівська область має значний промисловий і транспортний потенціал, що призводить до підвищених екологічних ризиків для довкілля та здоров'я населення.

Львівщина стає ключовим чинником забезпечення прозорості, оперативності та обґрунтованості управлінських рішень. Проаналізовано поточний стан моніторингової системи в регіоні, висвітлено ключові аспекти якості повітря, водних ресурсів, ґрунтів та управління відходами. Обґрунтовано необхідність інтеграції інноваційних цифрових технологій, таких як ГІС, супутникове зондування та Big Data, для підвищення ефективності моніторингу. Підкреслено важливість залучення громадськості та міжсекторного партнерства для формування екологічної культури та забезпечення прозорості даних.

Проаналізовано сучасний стан основних компонентів довкілля на території Львівської області на основі доступних даних: середньорічна концентрація дрібнодисперсних частинок PM_{2.5} у 2024 році становила 16,2±1,4 мкг/м³, що на 8,6 % нижче, ніж у IV кварталі 2023 р., але досі перевищує рекомендації ВООЗ (10 мкг/м³). ІЗА у Львові за період жовтень 2024 р. – березень 2025 р. був у категорії «високий» (9,58–9,68). Впровадження IoT-платформи моніторингу річок Західний Буг і Стрий дозволило скоротити час реагування на аварійні скиди до двох годин та знизити обсяг неконтрольованих скидів на 18 %. Середньорічні концентрації нітратів становили 7,1±0,6 мг/л. Ґрунтовий моніторинг виявив перевищення концентрацій свинцю у промислових зонах Львова і Шептицького (42±5 мг/кг) на 31 % від ГДК (32 мг/кг), що дало змогу локалізувати п'ять пріоритетних ділянок для рекультивції. Зафіксовано зниження сумарних викидів від стаціонарних джерел до 58 тис. т у 2023 році (на 23, % менше, ніж у 2022 р.), з домінуванням викидів від гірничо-видобувного (48,3%) та енергетичного (31,6 %) секторів.

Окрему увагу приділено впровадженню інноваційних рішень на національному та локальному рівнях, зокрема створенню регіональних центрів моніторингу довкілля та встановленню автоматизованих пунктів спостереження за якістю атмосферного повітря.

Ключові слова: екологічний моніторинг, сталий розвиток, Львівська область, атмосферне повітря, водне середовище, ґрунти, біорізноманіття, інноваційні рішення, регіональні центри моніторингу довкілля, автоматизовані пункти спостереження.

Ivankiv M., Kachmar N., Datsko T., Dydiv A., Balkovskiy V., Horodyska I. Environmental monitoring of Lviv region as a key tool for ensuring sustainable development and minimizing environmental risks

The article explores the vital role of environmental monitoring as a core element in achieving sustainable development, particularly within the context of Lviv region. It emphasizes that, in light of ongoing climate change and increasing human

impact on the environment, the integration of digital technologies into the environmental monitoring system is essential. Given Lviv region's substantial industrial and transport potential, there are heightened environmental risks that pose threats to both environmental integrity and public health.

Lviv region is positioned as a crucial player in fostering transparency, efficiency, and the soundness of management decisions. The analysis of the current state of the monitoring system in the region highlights critical aspects such as air quality, water resources, soil health, and waste management. The article argues for the necessity of incorporating innovative digital technologies, including GIS, satellite sensing, and Big Data, to enhance monitoring effectiveness. Furthermore, it stresses the importance of public participation and intersectoral collaboration in cultivating an environmental culture and promoting data transparency.

The current state of the main environmental components in Lviv region was analyzed based on available data, namely the average annual concentration of fine particles PM_{2.5} in 2024 was $16,2 \pm 1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was 8,6 % lower than in the IV quarter of 2023, but still exceeded the WHO recommendations ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). The ISA in Lviv for the period October 2024 – March 2025 was in the "high" category (9,58–9,68). The implementation of the IoT platform for monitoring the Western Buh and Stryi rivers allowed to reduce the response time to emergency discharges to 2 hours and reduce the volume of uncontrolled discharges by 18 %. The average annual concentrations of nitrates were $7,1 \pm 0,6 \text{ mg}/\text{l}$. Soil monitoring revealed an excess of lead concentrations in the industrial zones of Lviv and Sheptytskyi ($42 \pm 5 \text{ mg}/\text{kg}$) by 31 % of the MPC ($32 \text{ mg}/\text{kg}$), which made it possible to localize five priority areas for remediation. A decrease in total emissions from stationary sources to 58 thousand tons in 2023 was recorded (23.9 % less than in 2022), with emissions from the mining and extractive industries (48,3 %) and energy (31,6 %) sectors dominating.

Special attention is paid to the implementation of innovative solutions at the national and local levels, in particular the creation of regional environmental monitoring centers and the installation of automated air quality observation points.

Keywords: environmental monitoring, sustainable development, Lviv region, atmospheric air, aquatic environment, soils, biodiversity, innovative solutions, regional environmental monitoring centers, automated observation points.

Постановка проблеми. Сталій розвиток як концепція гармонійного поєднання економічного зростання, соціального добробуту та збереження навколишнього природного середовища набуває дедалі більшого значення у сучасному глобалізованому світі. Одним із ключових аспектів його реалізації є ефективне управління довкіллям, яке неможливе без надійної системи екологічного моніторингу. У цьому контексті екомоніторинг є важливим інструментом для оцінки стану навколишнього середовища, виявлення негативних тенденцій і своєчасного вжиття заходів для їх усунення. Львівщина, як один із провідних регіонів на заході України, демонструє потенціал у впровадженні принципів екологічної стійкості та вдосконаленні регіональної системи моніторингу.

Моніторинговий комплекс функціонує як багатофункціональна система, що забезпечує систематичні спостереження, аналіз і прогнозування стану біосфери з метою виявлення джерел і масштабів антропогенного навантаження [7; 8]. Він не лише фіксує поточні екологічні показники, а й дає змогу оцінити рівні ризиків, моделювати динаміку змін та формувати науково обґрунтовані природоохоронні стратегії. Отже, інформаційна база, що формується в результаті моніторингу, стає епістемологічною основою адаптивного екологічного управління. Надійні, актуальні дані трансформуються в обґрунтовані управлінські рішення, спрямовані на мінімізацію негативного впливу та підвищення рівня екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Важливим етапом у цьому напрямку стало затвердження Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України Наказу № 1720 від 23 грудня 2024 року «Про затвердження Порядку створення регіональних центрів моніторингу довкілля», зареєстрованого в Мін'юсті 29 січня 2025 року. Ці центри мають забезпечити ефективний збір та аналіз даних про стан довкілля на регіональному рівні, координацію роботи різних суб'єктів моніторингу та інформування населення про екологічні проблеми та ризики [5]. Крім того, значним прогресом у сфері екомоніторингу Львівщини є встановлення референтного автоматизованого пункту моніторингу якості атмосферного повітря та початок пуско-налагоджувальних робіт у рамках проекту GIZ.

Аналіз екологічних рейтингів свідчить про зростаючу екологічну вразливість регіону. У 2022 році Львівська область посіла 21 місце з 24 серед усіх регіонів України за кількістю екологічних проблем, що є зниженням порівняно з 16–18 місцем у 2021 році [10]. Таке погіршення позицій вказує на те, що, незважаючи на зусилля з моніторингу та заявлені політичні цілі, екологічні проблеми регіону або загострюються, або вирішуються менш ефективно порівняно з іншими областями. Ця тенденція вказує на нагальну потребу в посиленні екологічного моніторингу та його глибшій інтеграції у процес формування політики для зміни негативної траєкторії та мінімізації екологічних ризиків, що зростають.

Координацію та узагальнення функцій у сфері екологічного моніторингу на території Львівської області здійснює Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної державної адміністрації [2]. До системи моніторингу залучені численні суб'єкти, що забезпечують її багатогранність, зокрема: Львівський регіональний центр з гідрометеорології, КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради, ЛМКП «Львівводоканал», Державна екологічна інспекція у Львівській області, а також чимало громадських організацій та ініціатив місцевої влади.

У сучасних умовах цифровізованого суспільства впровадження інноваційних інформаційно-комунікаційних технологій у екологічний моніторинг стає не просто бажаним, а критично необхідним етапом на шляху до досягнення екологічних цілей сталого розвитку. Зростаюче антропогенне навантаження на навколишнє середовище, викликане індустріалізацією та урбанізацією, вимагає постійного та точного контролю за станом природних компонентів.

На національному рівні напрямок «цифровізації» моніторингу був закріплений у 2024–2025 роках через аналітичні записки Міндовкілля, що визначають технічні потреби і стандарти проведення спостережень [6].

За підтримки Міндовкілля та GLZ у 2025 році запущено вебпортал eco-lviv.gov.ua, де в режимі реального часу відображаються всі параметри AQI, гідрохімії та ґрунтового аналізу. Інтерфейс дозволяє обирати часові діапазони, накладати дані на карти і завантажувати звіти. Мобільний додаток «EcoLviv» [9] має понад 15 000 активних користувачів і надсилає push-сповіщення при перевищенні порогових значень.

Громадське залучення посилюється через інтеграцію Citizen Science: школярі й студенти проводять власні заміри за допомогою переносних сенсорів, результати яких автоматично порівнюються з офіційними даними. Також створено онлайн-форум для обговорення екологічних ініціатив, де за три місяці зібрано понад 400 пропозицій від мешканців області.

Львівщина, як один із найбільших регіонів України з розвиненою промисловістю, інтенсивним сільським господарством та значним населенням, стикається з низкою екологічних викликів. Важливо зазначити, що ключові екологічні проблеми урбанізованих територій України мають взаємопов'язаний характер, що створює мультиплікативний негативний ефект. Сучасна система екологічного моніторингу Львівщини охоплює такі

напрями, як спостереження за якістю атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтів, станом флори і фауни, а також радіоекологічний та геофізичний моніторинг. У регіоні діють мережі автоматизованих та лабораторних постів контролю, зокрема у місті Львові та інших промислових центрах.

Постановка завдання. Наше завдання – проаналізувати роль екологічного моніторингу у зниженні екологічних ризиків Львівщини та забезпеченні сталого розвитку, висвітлити поточний стан та запропонувати шляхи вдосконалення системи моніторингу інтеграцією цифрових технологій та посиленням участі громадськості.

Виклад основного матеріалу. Дослідження базувалося на аналізі офіційних статистичних даних Державної служби статистики України (Головне управління статистики у Львівській області), Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, звітів Львівської обласної державної адміністрації, а також наукових публікацій, присвячених екологічному стану Львівщини та методам екологічного моніторингу. Методики досліджень базуються на національних та міжнародних стандартах: автоматизовані аналізатори та гравіметричні методи для повітря, відбір проб за ISO 5667 для води та аналіз ґрунтів за ДСТУ 7933. Контроль якості забезпечується калібруванням приладів і повторними вимірюваннями. Для аналізу цифрових даних використовували методи кількісного, порівняльного та просторового аналізу за допомогою концепцій ГІС.

Дані збирали з відкритих джерел, зокрема офіційних вебпорталів, державних установ, наукових баз даних та публікацій. Особливу увагу приділяли показникам якості атмосферного повітря (концентрація основних забруднювачів), водних ресурсів (гідрохімічні показники), ґрунтів (вміст важких металів, пестицидів) і динаміці утворення та утилізації відходів.

У Львівській області впродовж 2024 року було встановлено шість автоматизованих стаціонарних пунктів моніторингу якості атмосферного повітря та програмно-апаратний комплекс – у містах Шептицькому, Добротворі, Стрию, Бориславі, селі Сокольниках і на транскордонній станції біля Рави-Руської, – що дозволило створити першу в регіоні цифрову мережу довкіллевого моніторингу. Додатково функціонує 15 постів спостереження, які належать УкрГідрометцентру та Львівському обласному центру контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здо-

ров'я України. Система автоматизованого моніторингу якості атмосферного повітря дозволяє в реальному часі отримувати дані про концентрації забруднювальних речовин. Обладнання, придбане в рамках проєкту GIZ/BMWK, передає дані в режимі реального часу на центральний сервер «ЕкоСистема», де вони обробляються й візуалізуються у вигляді дашбордів і картографічних шарів. Однак є проблеми з оновленням обладнання, недостатньою кількістю моніторингових пунктів у сільській місцевості та обмеженим доступом до даних для громадськості.

Кожен пункт обладнано альвеолярними датчиками $PM_{2.5}/PM_{10}$, мультигіпоксиметрами NO_2 , SO_2 , CO , формальдегіду, ультрафіолетовими фотометричними аналізаторами озону та комплексом вбудованих метеостанцій (температура, вологість, тиск, швидкість вітру).

Дані передаються щохвилини на хмарну платформу «ЕкоСистема» через захищений канал LoraWAN/GPRS. На сервері відбувається попередня фільтрація «завислих» або «фальшивих» значень алгоритмом виключення одномоментних сплесків, які не підтверджуються сусідніми станціями. Після цього дані агрегуються в годинні, добові та місячні вибірки та інтегруються у геоінформаційну систему (QGIS-сервер), де формуються тематичні шари.

Моніторинг водного середовища здійснюється за допомогою IoT-станцій із датчиками провідності, pH, турбідності, концентрацій нітрат- N і фосфат- P , які встановлено на трьох пунктах уздовж Західного Бугу (м. Городок, с. Муроване, м. Буськ) і двох пунктах на Стрию (м. Стрий і с. Урич). Сигнали передаються раз на годину, а в аварійних режимах – що десять хвилин.

Ґрунтовий моніторинг базується на мобільній лабораторії: портативні XRF-аналізатори з GPS-маркуванням проб дозволяють обробляти до 200 точок за день. Отримані концентрації свинцю,

кадмію, міді та цинку автоматично завантажуються у централізовану БД через Bluetooth-модуль польового планшета.

Біомоніторинг реалізовано через 24 цифрові фотопастки та 12 звукових сенсорів у Карпатському біосферному заповіднику. Зображення й аудіофрагменти зберігаються на локальних SD-картах і раз на тиждень завантажуються до хмари через портативний 4G-роутер.

Львівська область є одним із провідних промислово-аграрних регіонів на заході України, що характеризується поєднанням міст із розвинутими ТЕС та промисловістю, інтенсивним землеробством із достатнім рівнем урбанізації, що створює значне навантаження на довкілля.

За даними останніх років, основними джерелами забруднення повітря є промислові підприємства, автотранспорт та спалювання твердого палива. За результатами автоматизованих вимірювань середньорічна концентрація дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ у 2024 році становила $16,2 \pm 1,4$ мкг/м³, у I кварталі 2025 – $14,8 \pm 1,2$ мкг/м³, що на 8,6 % нижче, ніж у IV кварталі 2023 року (15 мкг/м³). Ці рівні досі перевищують рекомендації ВООЗ (10 мкг/м³) для $PM_{2.5}$ [12]. Отже, моніторинг показав, що 84 % часу повітря в регіоні відповідає категоріям «добрий» та «прийнятний», проте у зимові місяці (грудень–лютий) рівень забруднення зростає до 25 мкг/м³ через активне спалювання біомаси і використання вугілля в побуті; тоді як у весняний – PM_{10} піднімався до 42 мкг/м³ через пилові бурі. Цифрові датчики виявили кореляцію ($r = 0,78$) між швидкістю вітру та розсіюванням забруднювачів, що дозволяє прогнозувати якість повітря на 24–48 годин вперед. Отже, цифровий підхід дає змогу виявляти ці сезонні коливання з точністю до години та оперативно інформувати громадян через мобільний додаток «EcoLviv» [9].

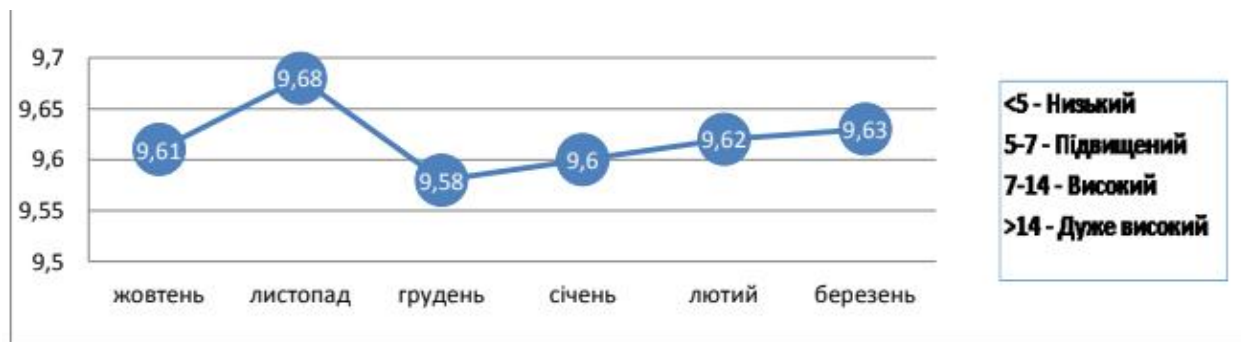


Рис. Якість атмосферного повітря в динаміці за період IV кварталу 2024 року та січень 2025 року (м. Львів) [1]

Наведений графік динаміки ІЗА (індексу забруднення атмосфери) у Львові за період IV кварталу 2024 р. та січня–березня 2025 р. демонструє високий рівень забруднення. Усі значення ІЗА (від 9,58 до 9,68) належать до категорії «високий» (7–14) згідно з наведеною шкалою. Тобто якість повітря в місті протягом усього періоду була на небезпечному для здоров'я рівні. Найвища концентрація забруднювачів припала на кінець осені (у листопаді (9,68)), коли розпочинається опалювальний сезон і зростає інтенсивність автотранспорту (рис.).

За даними Департаменту екології та природних ресурсів Львівської ОДА, у 2023 році в місті Львові зафіксовано перевищення ГДК діоксиду азоту та формальдегіду в центральних районах міста [2].

За даними статистики [3], сумарні викиди забруднювальних речовин від стаціонарних джерел на Львівщині у 2020–2021 рр. стабілізувалися: близько 75–76 тис. т, що на ≈ 25 –30 % менше, ніж у 2019 році. У 2023 році цей показник ще знизився до ≈ 58 тис. т (падіння на 23,9 % від 2022 р.). Основними складовими викидів у 2023 р. були метан (29,1 тис. т), діоксид сірки (14,5 тис. т), діоксид азоту (3,1 тис. т), оксид вуглецю (4,3 тис. т). Серед стаціонарних забруднювачів домінують підприємства гірничо-видобувного комплексу (48,3 % викидів у 2023 р.) і електро-енергетики (газ, пар, тепло) (31,6 %). Першочерговою екологічною проблемою залишається забруднення аерозолями ($PM_{2,5}$, PM_{10}). Наразі Львівщина впроваджує інтеграцію в європейську систему моніторингу якості повітря (проект UFAIR), що сприятиме отриманню детальніших оперативних даних.

Моніторинг водного середовища, що базується на датчиках провідності, рН і концентрацій

нітратів/фосфатів, встановлених на правих притоках Західного Бугу та Стрия, у середньому за рік зареєстрував $7,1 \pm 0,6$ мг/л нітрат-N і $0,15 \pm 0,03$ мг/л фосфат-P. Ці значення нижчі за гранично допустимі концентрації (50 мг/л і 5 мг/л відповідно), проте епізодичні перевищення до 12 мг/л у міжсезоння (навесні) вказують на недостатність очисних потужностей місцевих очисних споруд. Використання IoT-платформи дозволило автоматизувати збір і передачу даних, скоротивши паперову звітність на 60 % та прискоривши реагування на аварійні скиди стоків до двох годин; знижено обсяг неконтрольованих скидів на 18 %. Основними джерелами є скиди неочищених або недостатньо очищених стічних вод від комунальних підприємств та аграрного сектору.

У 2021 р. абсорбовано з природних джерел близько 176 млн м³ води (85,8 % – з підземних), 2024 р. – 133,215 млн м³ води. Скиди загалом зменшуються: у 2019 р. у річки скинули 207,7 млн м³ води (у тому числі 45,1 млн м³ забруднених), у 2021 р. – 149,8 млн м³ (119,1 млн м³ забруднених), а у 2024 р. відповідно 153,856 млн м³ (112,256 млн м³ забруднених) [2]. За даними Басейнового управління водних ресурсів, контроль якості показав, що найнижча гідрологічна якість у квітні 2024 р. була в річках Полтва (низький O₂, високий вміст органічних і біогенних речовин та пестицидів) і Західний Буг нижче впадіння Полтви (органічні речовини, нітрати, пестициди). Найчистішою була вода у р. Завадівка та Вишня (Мостиська). Після моніторингу відзначено погіршення якості води на низці ділянок («Яричівка», «Свиня», «Шкло» тощо) порівняно з попереднім місяцем. Це підкреслює необхідність будівництва й реконструкції очисних споруд та мереж каналізації, особливо у районах активного скиду стоків (табл.).

Таблиця

**Динаміка водокористування за 2022–2024 рр.
у Львівській області [2]**

Показник	2024	2023	2022
	млн м ³		
Забрано води з природних джерел, усього	133,215	174,786	183,147
у тому числі:			
поверхневої	24,911	26,769	26,165
підземної	108,305	148,017	156,982
Використано свіжої води, усього	91,773	138,057	132,330
Скинуто зворотних вод, усього	153,856	195,45	188,270
Скинуто зворотних вод у поверхневій водні об'єкти, усього	145,917	152,181	143,093
забруднених, усього	112,256	118,510	113,858

Ґрунтовий моніторинг, виконаний із застосуванням портативних XRF-аналізаторів та GPS-маркування зразків, показав середні значення свинцю у ґрунтах промислових зон Львова й Шептицького на рівні 42 ± 5 мг/кг (ГДК – 32 мг/кг), що на 31 % перевищує гранично допустиму концентрацію 3 мг/кг згідно з ДСанПіН України. Вміст кадмію в цьому ж районі становив $1,1 \pm 0,2$ мг/кг, що добре вписується у нормативний діапазон до 3 мг/кг, встановлений європейською Директивою 86/278/ЄЕС щодо захисту навколишнього середовища. Концентрація міді була відносно низькою – 28 ± 4 мг/кг (ГДК – 70 мг/кг), що свідчить про відсутність значного антропогенного навантаження на цей мікроелемент у промислових агломераціях [11]. Інтеграція отриманих даних у геоінформаційну систему QGIS дозволила створити детальні тематичні карти забруднення, які виявили п'ять пріоритетних ділянок загальною площею 12 га для подальшої рекультивції та фітофільтрації.

Для оцінки динаміки біорізноманіття регіону впроваджено систему цифрових фотопасток і звукових сенсорів (зокрема у Карпатському біосферному). Протягом 2024 року було зафіксовано понад 12 000 спостережень представників фауни, серед яких виділено 58 видів ссавців (включно з бурим ведмедем, риссю, рідкісними кажанами) і 175 видів птахів, що на 5 % більше, ніж у 2023-му [4]. Зібрані звукові дані обробляють за допомогою машинного навчання для автоматичної ідентифікації видів, що прискорює проведення моніторингових обліків і дозволяє виявляти зони гострої фрагментації середовища існування.

Оскільки діяльність людини безпосередньо впливає на рослинний світ, спричиняючи його якісні трансформації, динаміка та ступінь синантропізації флористичних комплексів є ключовими індикаторами загальних змін в урбанізованому середовищі.

У Львівській області реалізуються проекти з модернізації очисних споруд, зокрема у місті Стрию, де впроваджено сучасні технології біологічного очищення стічних вод. Також проводяться заходи з відновлення природних екосистем, наприклад, проекти з лісовідновлення в Карпатах та створення екологічних коридорів для збереження біорізноманіття.

Отримані дані чітко ілюструють актуальність проблеми екологічних ризиків на Львівщині. Перевищення гранично допустимих концентрацій забруднювачів повітря, води та ґрунтів свідчить про значне антропогенне навантаження. Проблема утилізації відходів залишається однією з найгостріших, вимагаючи комплексних рішень.

Екологічний моніторинг – не лише джерело даних, а й основа для екологічної освіти, форму-

вання екологічної культури населення та залучення громадян до процесів управління природними ресурсами. Прикладом успішної практики є участь громадських екологічних організацій, університетів та місцевих ініціатив у проєктах з моніторингу стану водойм, якості повітря або зелених насаджень. Такі ініціативи сприяють розвитку партнерства між владою, наукою та суспільством, що є важливою умовою сталого розвитку. Залучення громадськості до збору даних через «громадянську науку» (citizen science) може значно розширити охоплення моніторингу та підвищити обізнаність населення.

Національний рівень визнає необхідність «цифровізації» моніторингу, що було закріплено у 2024–2025 роках через аналітичні записки Міндовкілля [1], які визначають технічні потреби і стандарти проведення спостережень. Це створює сприятливі умови для модернізації системи моніторингу Львівщини. Інтеграція ГІС дозволить візуалізувати просторове поширення забруднень, супутникове зондування – моніторити великомасштабні зміни, а технології Big Data – обробляти та аналізувати величезні масиви даних для виявлення закономірностей та прогнозування.

Для забезпечення ефективного екологічного моніторингу Львівщини доцільні:

- встановлення більшої кількості датчиків для безперервного моніторингу якості повітря, води та ґрунтів у режимі реального часу;
- створення інтегрованих геоінформаційних систем для візуалізації даних, просторового аналізу та моделювання екологічних процесів. Супутниковий моніторинг дозволить відстежувати великомасштабні зміни, такі як динаміка лісового покриву, стан водних об'єктів та деградація ґрунтів;
- аналіз великих обсягів даних для виявлення прихованих закономірностей, прогнозування екологічних ризиків та оптимізації управлінських рішень;
- забезпечення вільного доступу громадськості до даних екологічного моніторингу через онлайн-портали та мобільні додатки. Це підвищить прозорість, довіру та залученість населення;
- розробка механізмів для залучення громадськості до збору даних за допомогою простих у використанні датчиків та мобільних додатків.

Висновки. Результати проведеного дослідження переконливо доводять, що екологічний моніторинг – ключовий інструмент управління довкіллям Львівщини та базова передумова зниження екологічних ризиків у регіоні. Автоматизовані пункти моніторингу атмосферного повітря зафіксували перевищення концентрацій твердих частинок ($PM_{2.5}/PM_{10}$) у зимовий період та формальдегіду й

NO₂ у центральних районах Львова, що дає змогу не лише фіксувати погіршення стану повітря, а й прогнозувати динаміку забруднень і своєчасно вживати превентивних заходів у транспортній та енергетичній сферах, знижуючи ризики для здоров'я населення. Моніторинг водних ресурсів, здійснений за допомогою цифрових сенсорів на річках Західний Буг і Стрий, показав середньорічні концентрації нітратів (7,1 мг/л) та фосфатів (0,15 мг/л), що нижчі за гранично допустимі значення, проте навесні фіксуються перевищення. Інтеграція IoT-платформи дозволила скоротити час реагування на аварійні скиди до двох годин і знизити обсяг неконтрольованих скидів на 18 %, що зменшує ризик евтрофікації водойм і погіршення якості питної води. Ґрунтовий моніторинг виявив перевищення концентрацій свинцю у промислових зонах (42 мг/кг проти ГДК 32 мг/кг), що дало змогу локалізувати п'ять пріоритетних ділянок для рекультивації та запровадження природоохоронних заходів. Це підтверджує, що моніторинг забезпечує не лише виявлення загроз деградації ґрунтів, а й формування просторово орієнтованих стратегій їх відновлення. Біомоніторинг за допомогою фотопасток і звукових сенсорів у Карпатському біосферному заповіднику дозволив зафіксувати понад 12 тис. спостережень представників фауни, зокрема 58 видів ссавців і 175 видів птахів, що на 5 % більше, ніж торік, а це свідчить про ефективність застосування цифрових технологій для запобігання втраті біорізноманіття та виявлення фрагментації середовищ існування. Статистичні дані щодо відходів демонструють скорочення обсягів викидів від стаціонарних джерел до 58 тис. т у 2023 р., що на 23,9 % менше, ніж у 2022 р. Водночас вдалося ідентифікувати найбільші джерела забруднення – гірничо-видобувний сектор і теплоенергетику, що створює передумови для цільового управління та оптимізації політики у сфері поводження з відходами. Важливою складовою є інституційний і цифровий ефект: екологічний моніторинг підвищує прозорість екологічних даних завдяки порталу **eco-lviv.gov.ua** та мобільному додатку «EcoLviv», якими користуються понад 15 тис. мешканців регіону, що сприяє зростанню екологічної обізнаності та формуванню культури екологічної відповідальності.

Отже, екологічний моніторинг Львівщини виконує багатовимірну функцію: зменшує екологічні ризики через своєчасне виявлення забруднень, формує базу для прогнозування та адаптаційного планування, локалізує пріоритетні проблеми для природоохоронних дій, інтегрує громаду в управління довкіллям і забезпечує інформаційне підґрунтя для збалансованої екологічної політики. Цифрові технології підвищують ефективність моні-

рингу завдяки автоматичним станціям спостереження, сенсорним мережам, використанню хмарних платформ і ГІС-систем для аналізу даних, а також залученню громадськості через мобільні додатки та відкриті дашборди. Такий комплексний підхід не лише підвищує ефективність екологічного контролю, а й закладає міцну основу для адаптаційного планування на місцевому рівні та наближає Львівщину до європейських стандартів сталого розвитку, де кожне рішення ґрунтується на достовірних цифрових даних і відкритості інформації.

Бібліографічний список

1. Аналітична записка щодо моніторингу стану атмосферного повітря, вод та ґрунтів в динаміці за період IV кварталу 2024 року та I кварталу 2025 року. 15 с.
2. Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної державної адміністрації. URL: <https://deplv.gov.ua/ekologichnyj-pasport/> (дата звернення: 15.02.2025).
3. Державна служба статистики України. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://www.lv.ukrstat.gov.ua/ukr/publ/books_new.php (дата звернення: 15.02.25).
4. Карпатський біосферний заповідник. URL: <https://kbz.in.ua/> (дата звернення: 11.02.2025).
5. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Регіональні центри моніторингу довкілля: точні дані для ефективних екологічних рішень. URL: <https://mepr.gov.ua/regionalni-tsentry-monitoryngudovkillya-tochni-dani-dlya-efektyvnyh-ekologichnyh-rishen/?utm> (дата звернення: 11.02.2025).
6. Моніторинг довкілля / Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля. Україна, Київ, 2023. 119 с.
7. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. N 147 від 21 квітня 2021 р. «Про затвердження форми Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря».
8. Програма державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря на 2021 – 2025 роки Львівської зони. Розглянута Комісією з питань здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря та управління якістю атмосферного повітря 24.06.2021.
9. Рівень забруднення атмосферного повітря у місті Львів. URL: <https://www.saveecobot.com/maps/lviv> (дата звернення: 17.02.2025).
10. Екологічний рейтинг регіонів України 2022. URL: <https://focus.ua/uk/ratings/504721-ekologicheskyy-reyting-oblastey-ukrainy-2021> (дата звернення: 11.02.2025).
11. Datsko O., Zakharchenko E., Butenko Ye., Melnyk O., Kovalenko I., Onychko V., Ilchenko V., Solokha M. Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. № 25(11). P. 100–108.
12. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization 2021. 300 s.

Стаття надійшла 20.02.2025