

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«Розробка заходів підвищення екологічної безпеки
урбоєкосистеми міста Вінниця»**

Виконав: студент групи ТЗД-24 м
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Назаренко І. П.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор кафедри ЕХТЗД

Петрук Р. В.

(прізвище та ініціали)

«9» грудня 2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент кафедри ЕХТЗД

Гордієнко О. А.

(прізвище та ініціали)

«9» грудня 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕХТЗД

к.т.н., доц. Іщенко В.А.

(прізвище та ініціали)

«09» грудня 2025 р.

Вінниця – 2025 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет
Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра Екології, хімії та технологій захисту довкілля
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 18 «Виробництво та технології»
Спеціальність – 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
Освітньо-професійна програма – «Технології захисту навколишнього середовища»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕХТЗД
Іщенко В.А.
« 24 » вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Назаренко Ілоні Павлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка заходів підвищення екологічної безпеки урбоекосистеми міста Вінниця»
керівник роботи Петрук Роман Васильович
затверджені наказом вищого навчального закладу від « 10 » вересня 2025 року № 2

2. Строк подання студентом роботи «09» грудня 2025 року

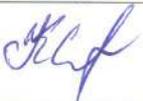
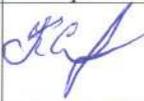
3. Вихідні дані до роботи: Статистичні та аналітичні матеріали щодо стану компонентів довкілля в межах урбоекосистеми м. Вінниця.

4. Зміст текстової частини:

1. Теоретико-методологічні основи забезпечення екологічної безпеки в урбанізованих екосистемах
2. Методичні та аналітичні підходи до дослідження стану екологічної безпеки
3. Впровадження інноваційних технологій та організаційних механізмів екологічної безпеки
4. Стратегічні напрями та інструменти підвищення рівня екологічної безпеки урбанізованих територій
5. Економічна оцінка та ефективність запропонованих екологічних рішень

5. Перелік ілюстративного матеріалу
 1. Рослинність низинних боліт Південного Бугу
 2. Карта ґрунтів Вінницької області
 3. Топографічна карта м. Вінниця
 4. Карта пожеж та напрямку вітру України
 5. Карта забруднення атмосферного повітря м. Вінниця
 6. Територія району Царина м. Вінниці

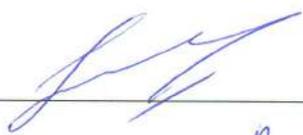
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
5 Економічна оцінка та ефективність запропонованих екологічних рішень	декан ФМІБ, к.е.н., доц. Краєвська Алла Станіславівна		

7. Дата видачі завдання « 24 » вересня __ 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітки
		початок	закінчення	
1	Огляд факторів, що впливають на безпеку урбоєкосистем в Україні.	24.09.2025	05.10.2025	
2	Аналіз джерел забруднення повітря у містах та їх динаміки.	05.10.2025	23.10.2025	
3	Дослідження стану ґрунтів і впливу урбанізації на їх якість.	23.10.2025	10.11.2025	
4	Оцінка стану водних об'єктів в умовах міського середовища.	10.11.2025	20.11.2025	
5	Узагальнення результатів, оформлення додатків та джерел. Підготовка тексту магістерської та візуальних матеріалів.	20.11.2025	27.11.2025	
6	Підготовка презентації та доповіді на захист МКР	27.11.2025	03.12.2025	

Студент  Назаренко І.П.

Керівник роботи  Петрук Р. В.

АНОТАЦІЯ

УДК 504.06

Назаренко І. П. «Розробка заходів підвищення екологічної безпеки урбоекосистеми міста Вінниця». Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища», освітня програма – «Технології захисту навколишнього середовища». Вінниця: ВНТУ, 2025. 77 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 35 назв; рис.: 11; табл.: 2.

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджено екологічний стан урбоекосистеми міста Вінниця, проаналізовано чинники ризику та джерела забруднення довкілля. Обґрунтовано напрями модернізації систем екологічного управління, зокрема систем водовідведення та очистки стічних вод. Проведено економічну оцінку доцільності впровадження енергоефективних технологій очищення на основі показників споживання електроенергії, вартості ресурсів та терміну окупності. Запропоновано практичні стратегії управління, адаптовані до умов урбанізованого середовища, із залученням громадськості та принципів сталого розвитку..

Ключові слова: урбоекосистема, екологічна безпека, моніторинг, Вінниця, водовідведення, економічна ефективність, сталий розвиток.

ABSTRACT

UDC 504.06

Nazarenko I. P. " Development of measures to improve the environmental safety of the urban ecosystem of Vinnytsia". Master's qualification work on specialty 183 – "Technologies of environmental protection", educational program – "Technologies of environmental protection". Vinnytsia: VNTU, 2025. 77 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 35 titles; Fig.: 11; tab.: 2.

The master's thesis explores the ecological condition of the urban ecosystem in the city of Vinnytsia, identifying risk factors and sources of environmental pollution. The study substantiates the directions for modernizing environmental management systems, particularly in wastewater treatment and discharge. An economic assessment of implementing energy-efficient purification technologies was carried out based on electricity consumption, resource costs, and the payback period. Practical management strategies adapted to urban conditions were proposed, emphasizing public engagement and the principles of sustainable development.

Key words: urban ecosystem, environmental safety, monitoring, Vinnytsia, wastewater management, economic efficiency, sustainable development.

ВІДГУК
наукового керівника на магістерську кваліфікаційну роботу
Назаренко І. П. «Розробка заходів підвищення екологічної безпеки
урбоекосистеми міста Вінниця»

Сучасний стан урбоекосистем, зокрема в межах міста Вінниці, викликає занепокоєння через зростання антропогенного навантаження та недостатню ефективність існуючих екологічних механізмів. Забезпечення екологічної безпеки міського середовища потребує комплексного підходу, що включає аналіз, моніторинг, розробку управлінських стратегій і впровадження технічних рішень. Саме цим питанням і присвячено магістерську кваліфікаційну роботу.

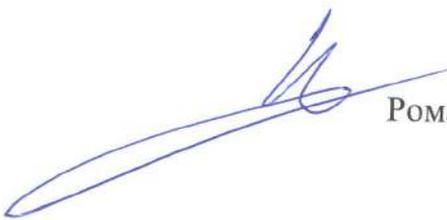
У процесі виконання магістерської роботи магістрант продемонстрував високий рівень аналітичного мислення, зібрав та узагальнив значний обсяг матеріалу щодо стану урбанізованого середовища, дослідив чинники впливу на екологічну стабільність, а також запропонував шляхи підвищення ефективності управління екосистемами міста.

Особливої уваги заслуговує економічний розділ роботи, де проведено оцінку доцільності модернізації очисних споруд із чітким економічним обґрунтуванням, що має практичне значення для комунального господарства міста.

Магістрант проявив відповідальність, системність у роботі, вміння працювати з науковими джерелами та нормативною базою. Усі завдання були виконані вчасно та на належному рівні.

Магістерська кваліфікаційна робота відповідає вимогам, викладеним у методичних рекомендаціях, має наукову новизну та прикладне значення. Рекомендую оцінити роботу на "А".

Науковий керівник:
д. т. н., професор ЕХТЗД


Роман ПЕТРУК

ВІДГУК

опонента на магістерську кваліфікаційну роботу Назаренко І. П. «Розробка заходів підвищення екологічної безпеки урбоекосистеми міста Вінниця»

Актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи, присвяченої підвищенню екологічної безпеки урбоекосистем на прикладі міста Вінниця, не викликає сумнівів, зважаючи на зростання урбанізаційних процесів та потребу у формуванні ефективної екологічної політики в містах України.

У процесі підготовки роботи магістрант проявив глибоке розуміння теоретичних основ і практичних механізмів управління урбоекосистемами, продемонстрував уміння працювати з нормативною базою, статистичними джерелами та інструментами екологічного моніторингу.

У роботі системно розглянуто як загальнотеоретичні засади екологічної безпеки, так і конкретні напрями вдосконалення міської екологічної інфраструктури, зокрема очищення стічних вод та управління якістю атмосферного повітря.

Високий рівень демонструє також економічна частина: наведено розрахунки ефективності модернізації очисних споруд, проаналізовано строк окупності, споживання енергії та соціально-екологічні вигоди.

Єдине зауваження стосується стилістики окремих підрозділів — подекуди надмірна деталізація прикладів ускладнює сприйняття й відволікає від головного змісту.

Загалом, робота вирізняється логічністю структури, глибоким аналізом, чітко аргументованими пропозиціями та науково-практичною цінністю.

Магістерська кваліфікаційна робота заслуговує на оцінку "А"..

Опонент:

к.т.н., доцент кафедри ЕХТЗД



Ольга ГОРДІЄНКО

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМАХ.....	6
1.1 Екологічна безпека як ключовий компонент концепції сталого розвитку.....	6
1.2 Сукупність природних і антропогенних чинників, що формують стан урбоекосистем	10
1.3 Сучасні наукові підходи та моделі оцінювання екологічної безпеки урбанізованих територій.....	13
2 МЕТОДИЧНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	18
2.1 Методи і критерії оцінювання екологічного стану міських екосистем	18
2.1.1 Систематизація основних інструментів аналізу стану довкілля.....	20
2.1.2 Огляд актуальних методів моніторингу, прогнозування та управління змінами екосистем	23
2.2 Використання геоінформаційних систем та моделювання в оцінюванні екологічної безпеки урбоекосистем	30
2.3 Прикладні аспекти впровадження заходів з екологічної безпеки у міському середовищі.....	38
3 ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	42
3.1 Вплив громадських ініціатив та участі населення у формуванні безпечного екологічного простору міста	42
3.2 Аналіз реалізованих організаційно-технічних заходів у межах міських систем для підвищення екологічної безпеки.....	44
4 СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ	48
4.1 Розроблення стратегій екологічного управління урбоекосистеми.....	48

4.2 Перспективні тенденції та практичні рішення у сфері екологічної безпеки міст	50
5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ	54
5.1 Економічна доцільність впровадження енергоощадного вуличного освітлення як стратегії екологічного управління містом	54
5.2 Економічна ефективність впровадження заходів з модернізації систем очищення стічних вод в урбоекосистемі	56
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
Додаток А. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	66
Додаток Б. Ілюстративна частина.....	67

ВСТУП

Урбоекосистеми, які включають міста та прилеглі території, є складними динамічними системами, що зазнають постійного антропогенного впливу. Зростання чисельності населення, розширення меж міст, інтенсифікація промислового та транспортного навантаження призводять до загострення екологічних проблем в урбанізованих регіонах. Забруднення повітря, ґрунтів, водойм, накопичення твердих побутових відходів, порушення природних ландшафтів – все це становить загрозу для здоров'я людей та стабільного функціонування міських екосистем.

Тема екологічної безпеки урбоекосистем є надзвичайно актуальною, оскільки від її вирішення залежить якість життя мільйонів городян. Дослідження в цій сфері спрямовані на розробку ефективних заходів щодо мінімізації негативного впливу антропогенної діяльності, впровадження екологічно безпечних технологій, раціонального природокористування та збереження міського довкілля.

Метою кваліфікаційної роботи є комплексне дослідження стану екологічної безпеки урбоекосистем та розробка практичних рекомендацій щодо її підвищення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати теоретичні аспекти екологічної безпеки урбоекосистем.
2. Дослідити основні джерела та чинники забруднення міського середовища.
3. Оцінити рівень екологічної безпеки на прикладі міста Вінниця, Вінницької області.
4. Розробити комплекс заходів з покращення екологічної безпеки в міських екосистемах.
5. Оцінити впроваджені організаційні заходи в міських системах з метою забезпечення екологічної безпеки урбоекосистем.

Об'єктом дослідження є урбоекосистеми та процеси, що визначають їх екологічну безпеку.

Предметом дослідження є теоретичні, методичні та практичні аспекти забезпечення екологічної безпеки урбоекосистем.

Методи дослідження, використані в роботі, включають аналіз літературних джерел з теми дослідження, статистичні методи, моделювання, соціологічні опитування, натурні спостереження та експериментальні дослідження.

Новизна одержаних результатів. Вперше проведено комплексну оцінку екологічної безпеки урбоекосистеми міста Вінниця з інтеграцією геоінформаційних систем, біоіндикаторних методів (на основі флуктуаційної асиметрії рослин) та математичного моделювання, що дозволило виявити просторово-часові закономірності забруднення та запропонувати адаптивні стратегії управління на основі басейнового принципу.

Розроблено економічні моделі оцінки ефективності впровадження інноваційних технологій (LED-освітлення та мембранної біореакції для очищення стічних вод) в урбоекосистемах, з розрахунком періоду окупності та екологічного ефекту (зменшення викидів CO₂), що забезпечує науково обґрунтовану основу для переходу до принципів циркулярної економіки в міському господарстві.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні матеріали та висновки роботи знайшли відображення у публікації.

1. Ілона Павлівна Назаренко, Олександр Петрович Цимбалюк, Комплексна оцінка екологічної безпеки урбоекосистем великих міст України на основі інтегральних індексів та GIS-моделювання. Міжнародна науково-технічна конференція Енергоефективність в галузях економіки України. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 470 с. ISBN 978-617-8163-05-1 [1].

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

1.1 Екологічна безпека як ключовий компонент концепції сталого розвитку

Система забезпечення екологічної безпеки в Україні формується на основі цілісного комплексу взаємопов'язаних політичних, економічних, технічних, правових, організаційних та соціальних механізмів. Державне регулювання в цій сфері реалізується через широкий спектр заходів, які мають різну функціональну спрямованість: превентивно-організаційну, регулятивно-стимулюючу, розпорядчо-виконавчу, охоронно-відновлювальну та забезпечувальну. Сукупність таких інструментів формує єдину державно-правову систему екологічної безпеки, що покликана не лише реагувати на екологічні загрози, але й запобігати їх виникненню, стабілізувати стан довкілля та мінімізувати ризики для життя і здоров'я населення, а також для природних систем [13].

Використання поняття «екологічна безпека» зумовлене потребою більш повно описати взаємодію суспільства і природи, адже традиційні категорії — «охорона навколишнього середовища», «природні ресурси» чи «екологічна рівновага» — не відображають масштабності сучасного антропогенного впливу. У випадках надмірного або неконтрольованого господарського навантаження відбуваються незворотні зміни окремих компонентів довкілля — атмосферного повітря, водних об'єктів, ґрунтового покриву, біорізноманіття — що призводить до втрати природної стійкості екосистем.

Концепція сталого розвитку передбачає збалансоване поєднання економічних, соціальних і екологічних інтересів, що забезпечує збереження природного потенціалу для нинішнього та майбутніх поколінь. У цьому контексті екологічна безпека виступає однією з головних умов сталого розвитку, адже саме вона визначає межі допустимого антропогенного впливу. Вона є базовою передумовою економічної безпеки як окремих підприємств,

так і регіонів, оскільки забруднення довкілля, деградація природних ресурсів чи кліматичні зміни безпосередньо впливають на виробництво, здоров'я населення та рівень життя суспільства [15].

Сутність екологічних загроз полягає в різноманітності їх форм прояву — від локального забруднення до глобальних змін клімату. Наслідки цих процесів проявляються у соціальній, економічній та фізіологічній сферах життя людини. Саме тому оцінювання стану екологічної безпеки повинно ґрунтуватися на міждисциплінарному підході, який враховує взаємозв'язок природних, техногенних і соціально-економічних процесів.

Вплив людської діяльності поступово трансформує природні системи — від природного стану до техногенно змінених. Такі системи часто втрачають природну рівновагу, стають залежними від технічної підтримки й управління. У цьому контексті екологічна безпека означає стійке функціонування антропогенно трансформованих екосистем та підтримання їх здатності до самовідновлення.

Погляди В. І. Вернадського на перехід біосфери у техносферу набувають особливого значення у сучасних умовах. Техносфера, створена людством, забезпечила комфорт і розвиток цивілізації, але водночас стала головним джерелом екологічних загроз через порушення природних законів еволюції, зміну біогеохімічних циклів і надмірну експлуатацію ресурсів.

Таким чином, людство опинилося перед стратегічним вибором: або відновлення рівноваги біосфери, або перебудова техносфери на принципах екологічної гармонії. Сучасне розуміння екологічної безпеки передбачає усвідомлений перехід від техносферного до біосферно орієнтованого розвитку, де головну роль відіграють інтелект, екологічна свідомість і відповідальність людини за наслідки своєї діяльності [6].

Період хаотичного, безконтрольного використання природних ресурсів поступово змінюється етапом керованого сталого розвитку, який ґрунтується на науковому розумінні природних законів і механізмів їх збереження.

Екологічна безпека у цьому аспекті ототожнюється зі здатністю екосистеми зберігати стійкість і рівновагу при впливі зовнішніх факторів, а також із її потенціалом до саморегуляції та відновлення. Отже, екологічна безпека фактично є показником життєздатності природних систем.

Як зазначають Самойленко О. В. та Пласкальний В. В., екологічна безпека — це не лише окрема сфера екологічної політики, а інтегрований елемент сталого розвитку, який поєднує економічні, соціальні та природоохоронні інтереси. Вона передбачає створення умов для збереження біорізноманіття, раціонального використання природних ресурсів і запобігання деградації довкілля шляхом впровадження екологічно безпечних технологій та енергоефективних рішень.

В умовах глобальних екологічних викликів — зміни клімату, урбанізаційного тиску, ресурсного виснаження — екологічна безпека стає основою стратегічної політики держави. Її принципи інтегруються у виробничу, транспортну, енергетичну, аграрну та будівельну сфери. Вони спрямовані на мінімізацію шкідливих викидів, впровадження замкнених циклів виробництва, розвиток відновлюваної енергетики та покращення якості життя населення.

Досягнення високого рівня екологічної безпеки потребує системного підходу, який включає:

- розроблення та застосування екологічно безпечних технологій;
- контроль за джерелами забруднення і дотриманням нормативів викидів;
- удосконалення системи екологічного моніторингу;
- стимулювання переходу до циркулярної економіки;
- збереження природних екосистем і біорізноманіття.

Таким чином, екологічна безпека є не лише інструментом запобігання екологічним ризикам, а й фундаментальною передумовою сталого розвитку суспільства, що забезпечує гармонійні відносини між природою і людиною та гарантує екологічну стабільність для наступних поколінь.

Поняття сталого розвитку тісно пов'язане з потенціалом екологічної безпеки, який включає низку ключових компонентів, важливих для формування стабільного природного середовища:

1. Природоохоронно-територіальний компонент, що характеризує наявність заповідних зон, природних парків і територій з обмеженим використанням ресурсів.

2. Територіально-безпековий аспект, який визначає рівень екологічного ризику для життєдіяльності населення у зонах підвищеного техногенного навантаження.

3. Проектно-інвестиційний компонент, пов'язаний із реалізацією програм, спрямованих на відновлення природного середовища, та із залученням фінансових, наукових і організаційних ресурсів.

4. Інфраструктурно-екологічний аспект, який відображає стан та ефективність функціонування природоохоронних об'єктів, відповідність їх міжнародним стандартам сталого розвитку.

5. Енергетично-екологічний компонент, що включає розвиток альтернативних джерел енергії, зменшення вуглецевого сліду і перехід до енергетики майбутнього.

Науковиця Ю. В. Орловська у своїх дослідженнях підкреслює, що міжнародний потенціал екологічної безпеки визначається рівнем інтеграції держави у світові екологічні процеси — участю в міжнародних угодах і конвенціях, доступом до екологічних фондів, підтримкою глобальних ініціатив і програм. Водночас просторовий аспект екологічної безпеки охоплює можливості використання природних ресурсів і механізмів забезпечення екологічної стабільності на глобальному, регіональному та локальному рівнях [28].

1.2 Сукупність природних і антропогенних чинників, що формують стан урбоекосистем

Питання забезпечення екологічної безпеки в Україні належить до кола найважливіших державних пріоритетів, оскільки країна стикається з низкою складних і системних екологічних викликів. Надмірна концентрація промислових підприємств підвищеної екологічної небезпеки, зношення основних виробничих фондів, використання застарілого обладнання та технологій, неефективних у природоохоронному сенсі, призводять до значного антропогенного навантаження на природне середовище. Результатом цього стає забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтового покриву та зростання техногенного ризику для населення.

До ключових чинників, що посилюють екологічну небезпеку, належать також нераціональне використання природних ресурсів, недосконале територіальне планування, а також невідповідальне розміщення хімічно небезпечних виробництв і об'єктів із підвищеною пожежо- та вибухонебезпечністю. Значний вплив мають і наслідки Чорнобильської катастрофи, які й сьогодні залишають помітний слід у стані довкілля, впливаючи на рівень радіаційної безпеки в ряді регіонів [15].

Окрім того, небезпеку становить імпорт та впровадження в Україні екологічно ризикованих технологій, матеріалів і хімічних речовин без належного контролю. У деяких регіонах спостерігаються процеси підтоплення, ерозії, а також підвищена сейсмічна активність, що в сукупності створює багатофакторну систему екологічних загроз як для природного середовища, так і для людини.

Урбоекосистема визначається як складна відкрита екологічна система, що охоплює сукупність живих організмів, елементів неживої природи, а також штучно створених об'єктів, які взаємодіють у межах міського простору. Її функціонування базується на обміні речовиною, енергією та інформацією між природними і техногенними компонентами, що формує унікальне середовище існування.

До основних структурних елементів урбоекосистеми належать:

1. Міське населення, його соціально-економічна діяльність, споживання ресурсів та рівень екологічної свідомості, які безпосередньо визначають навантаження на довкілля.
2. Фауна — дикий і домашній тваринний світ, що адаптувався до умов урбанізованого середовища.
3. Флора — зелені насадження, дерева, чагарники, трав'яна рослинність, що виконують важливі екологічні функції, зокрема очищення повітря, шумозахист і зниження температурних коливань.
4. Ґрунтовий покрив, який виступає основою міської екосистеми, забезпечуючи життєдіяльність рослин і процеси самоочищення.
5. Водні ресурси — річки, озера, ставки, а також штучні водосховища, канали, системи водопостачання й каналізації, які відіграють вирішальну роль у підтриманні природного балансу.
6. Атмосфера міста, що акумулює газові викиди, пари, пил та інші забруднювачі, які визначають якість повітря та рівень комфорту життя населення.

Міські екосистеми функціонують у складних умовах взаємодії численних природних, соціальних та техногенних факторів. Одним із найсуттєвіших серед них є забруднення атмосферного повітря, яке у великих містах досягає критичних рівнів через інтенсивний розвиток транспортної мережі, високу концентрацію промислових підприємств і неефективну систему екологічного контролю. Викиди оксидів азоту, сірки, чадного газу, важких металів і дрібнодисперсних частинок призводять до формування смогу, підвищення рівня захворюваності населення та деградації міського довкілля.

Не менш небезпечним є забруднення ґрунтів і водних об'єктів, спричинене неналежним поводженням із відходами, несанкціонованими сміттєзвалищами та незаконним скиданням промислових і побутових стічних вод. Такі процеси ведуть до втрати родючості ґрунтів, зміни їх хімічного

складу, потрапляння токсичних речовин у харчові ланцюги, а також до загибелі водних організмів і руйнування природних біоценозів.

Серед довгострокових факторів, що визначають стан урбанізованих екосистем, важливе місце займають урбанізаційні процеси, зміни у використанні земель та глобальні кліматичні зрушення. Урбанізація, як історично закономірний етап розвитку цивілізації, супроводжується швидким зростанням міського населення, розширенням меж міст та концентрацією промислових, транспортних і енергетичних об'єктів. Унаслідок цього відбувається скорочення природних територій, деградація зелених зон і втрата біорізноманіття.

Розширення міських територій, будівництво житлових комплексів, транспортних артерій, торгових центрів та інших об'єктів інфраструктури призводять до зменшення площ природних екосистем, ущільнення ґрунтів, підвищення рівня забруднення повітря та води. Особливої шкоди завдає безконтрольне вирубування зелених насаджень і забудова прибережних зон, що знижує здатність урбанізованих територій до природної регенерації.

Не менш значущим фактором є зміна клімату, яка проявляється у підвищенні середньорічних температур, зменшенні кількості опадів, збільшенні частоти посух, паводків і злив. Урбанізовані території особливо вразливі до цих змін через ефект «міських теплових островів», дефіцит зелених зон і високу концентрацію джерел теплових викидів. Наслідками кліматичних змін є порушення режиму водопостачання, зниження рівня ґрунтових вод, зміна біорізноманіття та збільшення енергоспоживання в містах [5].

Сукупність вищезгаданих процесів створює складну багатофакторну систему екологічних ризиків, у межах якої природні та техногенні фактори взаємодіють, підсилюючи один одного. Це призводить до поступового зниження екологічної стійкості урбоекосистем та погіршення якості життя населення.

Для збереження екологічної рівноваги та забезпечення сталого функціонування міських екосистем необхідно формувати комплексну систему управління урбаністичним довкіллям, яка базувалася б на принципах сталого розвитку. Така система має включати моніторинг стану довкілля, управління земельними ресурсами, планування зелених зон, розвиток екологічного транспорту, раціональне водокористування та впровадження екологічно безпечних технологій у промисловості.

Особливу роль відіграє екологічна політика місцевого самоврядування, спрямована на розвиток систем озеленення, переробку відходів, зменшення використання енергоємних ресурсів і підвищення екологічної свідомості населення.

Тільки завдяки інтегрованому підходу, який поєднує природоохоронні, технічні, соціальні та економічні інструменти, можливо досягти стабільності урбоекосистем і створити безпечне середовище для життя майбутніх поколінь.

1.3 Сучасні наукові підходи та моделі оцінювання екологічної безпеки урбанізованих територій

Моделювання процесів екологічної безпеки урбанізованих територій є одним із ключових інструментів сучасної екологічної науки, оскільки дозволяє прогнозувати зміни в міському середовищі, оптимізувати управлінські рішення та підвищувати ефективність природоохоронних заходів. Моделі екологічної безпеки урбоекосистем спрямовані на збереження природних ресурсів, мінімізацію негативного впливу техногенних факторів та формування гармонійної взаємодії між людиною і природою.

Такі моделі враховують системний характер міського середовища, його просторову структуру, інтенсивність антропогенного навантаження, а також соціально-економічні аспекти функціонування міст. Їх використання дає змогу визначати екологічні ризики, розробляти сценарії сталого розвитку та підвищувати якість екологічного планування на рівні міських територій [5].

Одним із центральних принципів створення моделей екологічної безпеки є збереження біорізноманіття, раціональне використання природних

ресурсів та оптимізація просторової структури урбанізованих територій. Ефективне екологічне планування передбачає баланс між потребами розвитку міста та збереженням природних компонентів середовища, що досягається за допомогою системи зелених зон, контролю за промисловими викидами, упорядкуванням полігонів відходів і поступовим переходом до екологічно безпечних технологій.

Значне місце у дослідженнях екологічної безпеки займає застосування математичних, інформаційних та імітаційних моделей, які дозволяють прогнозувати наслідки дії різних чинників на довкілля, аналізувати ефективність управлінських рішень і оцінювати рівень екологічної стабільності урбоекосистем. Завдяки сучасним комп'ютерним технологіям можливо опрацьовувати великі обсяги просторових і статистичних даних, створюючи динамічні сценарії розвитку міського середовища [23].

У наукових працях і монографіях, зокрема у виданні «Геоінформаційні системи і бази даних» під редакцією Зацерковного В. І., Бурачка В. Г., Железняка О. О. та Терещенко А. О., запропоновано низку прикладних моделей, які відображають різні аспекти екологічної безпеки урбанізованих територій [5]. До них належать:

1. Математична модель з урахуванням внеску зелених насаджень у зниження шумового навантаження в урбанізованому середовищі. Вона базується на розрахунку інтегрального показника шумопоглинальної здатності зелених смуг та дозволяє визначити оптимальні параметри локального озеленення для формування ефективних природних бар'єрів (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Структурна схема математичного моделювання екологічної стійкості урбанізованих екосистем

2. Багаторівнева модель управління екологічною безпекою дитячих ігрових зон, спрямована на створення сприятливих і безпечних умов для перебування дітей у міському середовищі. Вона враховує стан ґрунтів, повітря, рівень шуму, санітарно-гігієнічні показники та дозволяє розробляти алгоритми для оцінювання якості міських територій рекреаційного типу (рис. 1.2).

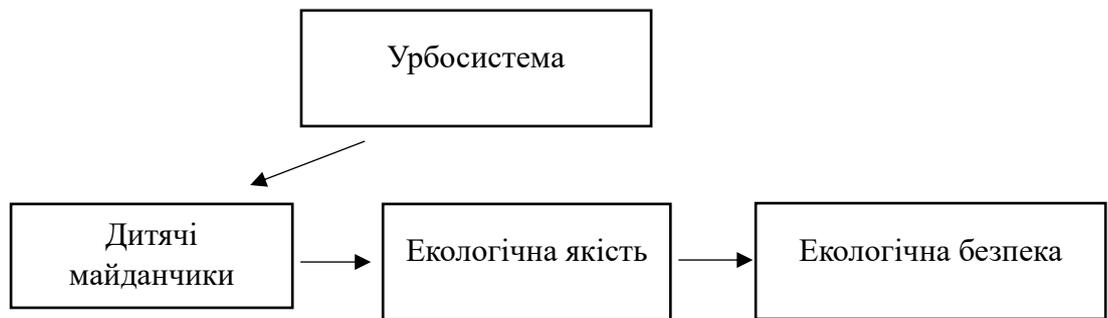


Рисунок 1.2 – Ієрархічна система екологічного управління безпекою дитячих майданчиків

3. Комплексна модель урбоекосистеми як соціально-економічної багаторівневої територіальної системи, що враховує взаємодію природних, техногенних і соціальних компонентів міського простору. Вона дозволяє визначати залежності між економічним розвитком, екологічними навантаженнями та станом природного середовища (рис. 1.3).

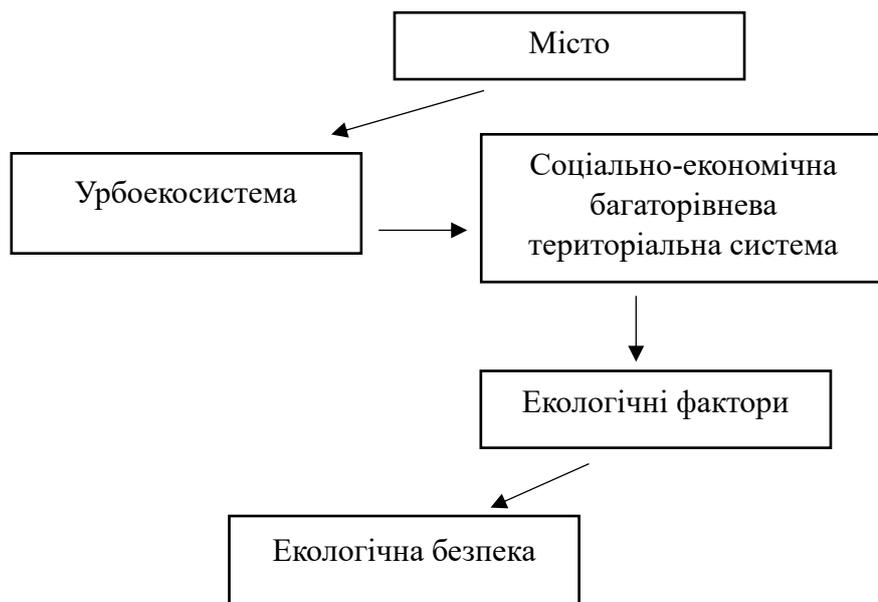


Рисунок 1.3 – Багаторівнева соціально-економічна система для підтримки екологічної стабільності міст

Перелічені моделі демонструють різноманіття підходів — від математичних і функціональних до концептуально-системних, що дає змогу аналізувати не лише окремі екологічні фактори, а й комплексну динаміку змін у міських екосистемах.

Особливе місце серед інструментів оцінки посідає математичне моделювання, яке дає змогу визначити інтегральний показник екологічної якості середовища. При цьому враховуються не лише фізико-хімічні параметри, а й соціально-економічні характеристики — щільність населення, рівень промислової активності, транспортне навантаження, ефективність природокористування тощо. Важливим елементом є порівняння фактичного стану природних ресурсів із нормативними або базовими показниками, що відображають умови мінімального антропогенного впливу.

Інтегральна оцінка стану екосистеми дозволяє отримати комплексний індекс екологічної безпеки, який відображає рівень екологічної стійкості, комфортність середовища для проживання людини та здатність урбанізованої території до саморегуляції. Такий підхід забезпечує можливість порівняння різних міст, виявлення проблемних зон і прийняття ефективних управлінських рішень [23].

Сучасні наукові дослідження вказують на зростання ролі комп'ютерного моделювання та геоінформаційних технологій у формуванні політики екологічної безпеки. Як відзначають Васенко О. Г., Рибалова О. В. та Артем'єв Н. С., розвиток цифрових технологій дав змогу перейти від статичних моделей до динамічних імітаційних систем, що дозволяють віртуально відтворювати функціонування екосистем, аналізувати наслідки втручань і оцінювати ефективність екологічних стратегій [20].

Імітаційне моделювання у сфері екологічної безпеки дає змогу створювати віртуальні сценарії розвитку міст із різним рівнем техногенного навантаження, здійснювати порівняння варіантів містобудівних рішень і прогнозувати вплив управлінських дій на стан довкілля. Це є надзвичайно

важливим інструментом для органів місцевого самоврядування, планувальників і фахівців із екологічного менеджменту.

Отже, розробка та впровадження моделей екологічної безпеки урбоекосистем створює наукове підґрунтя для практичного управління екологічними процесами у містах. Вони дозволяють не лише знижувати ризики забруднення, а й формувати нову парадигму розвитку — сталий, збалансований і технологічно адаптований простір, у якому забезпечується екологічна рівновага, висока якість життя населення та збереження природного потенціалу для наступних поколінь.

2 МЕТОДИЧНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

2.1 Методи і критерії оцінювання екологічного стану міських екосистем

Зростання масштабів урбанізації в Україні супроводжується значним антропогенним навантаженням на природне середовище, що спричиняє деградацію екосистем і погіршення умов життя населення. Саме тому питання оцінювання екологічного стану міських екосистем набуває особливої актуальності. Оцінка та моніторинг стану довкілля дозволяють виявляти негативні тенденції, своєчасно реагувати на зміни екологічних параметрів і розробляти дієві заходи для підвищення рівня екологічної безпеки у містах.

Комплексне оцінювання екологічного стану урбоекосистем базується на сукупності методів і критеріїв, які враховують як природні, так і техногенні фактори. Метою цих досліджень є визначення рівня забруднення повітря, води, ґрунтів, рівня шуму, стану зелених насаджень та біорізноманіття, а також оцінка екологічного комфорту міського середовища.

Методи оцінювання поділяються на кілька груп:

1. Інструментальні методи – передбачають безпосередні вимірювання концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, воді та ґрунті за допомогою спеціальних приладів і датчиків.

2. Лабораторні методи – застосовуються для аналізу складу проб, визначення наявності токсичних компонентів, важких металів і радіонуклідів.

3. Аналітичні та розрахункові методи – використовуються для визначення екологічних індексів і показників, які характеризують рівень забруднення територій.

4. Соціально-екологічні методи – базуються на опитуваннях населення, оцінках рівня комфортності проживання, а також сприйнятті екологічного стану міста жителями.

5. Інформаційно-аналітичні методи – поєднують геоінформаційні технології (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), бази екологічних даних та програмне моделювання процесів у довкіллі.

Важливе значення мають критерії оцінки, що дозволяють порівнювати стан екосистем різних міських районів. До них належать:

- індекс забруднення атмосфери (ІЗА);
- інтегральний показник екологічного стану (ШПЕС);
- індекс якості водних об'єктів;
- показник зеленого покриття території;
- рівень антропогенного навантаження;
- індекс екологічного комфорту міського середовища.

На сучасному етапі розвитку науки важливу роль у системі екологічного оцінювання відіграють геоінформаційні системи, які дозволяють поєднувати результати польових вимірювань, статистичні дані та просторовий аналіз. З їх допомогою створюються цифрові карти забруднення, моделюються зони розповсюдження шкідливих речовин, проводиться прогнозування змін у міських екосистемах.

Велике значення має і дистанційне зондування Землі, яке дає змогу аналізувати стан міських територій з космосу. Супутникові знімки дозволяють визначати площі зелених насаджень, рівень урбанізації, динаміку забудови та температурні аномалії (“теплові острови”). Поєднання цих технологій з наземними спостереженнями забезпечує найповнішу картину екологічного стану міста [2].

Сьогодні для більшості великих міст ефективним є створення автоматизованих систем екологічного моніторингу, які збирають і обробляють дані у реальному часі. Це дозволяє швидко реагувати на перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин і здійснювати управління екологічною безпекою на основі аналітичних моделей.

У системі екологічного управління все частіше використовується еколого-економічний аналіз, який дає можливість оцінювати співвідношення між витратами на природоохоронні заходи та економічними втратами від забруднення. Такий підхід дозволяє визначати найбільш ефективні напрямки екологічної політики на муніципальному рівні [7].

Отже, методи і критерії оцінювання екологічного стану міських екосистем утворюють цілісну систему, яка поєднує природничо-наукові, технічні та соціально-економічні аспекти. Їхнє застосування забезпечує можливість контролю стану довкілля, своєчасного реагування на зміни та реалізації концепції сталого розвитку у межах міського середовища.

2.1.1 Систематизація основних інструментів аналізу стану довкілля

Комплексне дослідження екологічного стану міських екосистем базується на використанні різних методів і засобів моніторингу, які дозволяють отримати достовірну, багатопланову інформацію про якість навколишнього середовища. Систематизація таких інструментів забезпечує узгодженість спостережень, аналітичних досліджень і моделювання екологічних процесів, що є основою для прийняття науково обґрунтованих управлінських рішень.

Інструментальні методи займають центральне місце в системі екологічного моніторингу. Вони передбачають пряме вимірювання показників стану довкілля за допомогою спеціальних приладів і сенсорів. До таких методів належать фізико-хімічні способи контролю, що базуються на відборі проб повітря, води, ґрунтів і подальшому їх лабораторному аналізі. Це дає можливість точно визначати склад речовин, їх концентрацію, ступінь токсичності, а також просторово-часову динаміку поширення забруднювачів у межах урбанізованої території.

Для підвищення ефективності інструментальних вимірювань у містах дедалі частіше використовуються автоматизовані екологічні станції спостереження, що забезпечують безперервний збір даних про стан повітря, рівень шуму, вібраційне навантаження, температуру та інші параметри. Такі

станції інтегруються у системи ГС-моніторингу, які дозволяють аналізувати просторовий розподіл забруднень і візуалізувати отримані результати у вигляді тематичних карт.

Розрахункові методики застосовуються для визначення ступеня антропогенного навантаження на екосистеми. Вони ґрунтуються на обчисленні кількості шкідливих речовин, що потрапляють у повітря, воду чи ґрунт у результаті діяльності промислових підприємств, транспорту або комунального господарства. Такі розрахунки дозволяють оцінити масштаб впливу людської діяльності на довкілля та визначити пріоритетні напрями зменшення викидів і відходів.

Особливу групу складають виробничі методи спостереження, що проводяться безпосередньо у межах або поблизу промислових майданчиків. Вони дають змогу оцінювати локальний екологічний стан територій, визначати рівень забруднення повітря і ґрунтів у зоні дії підприємств, а також відстежувати вплив промислових процесів на прилеглі житлові квартали.

Сучасна система екологічного моніторингу передбачає також спеціалізовані напрямки спостережень, які зосереджуються на окремих екологічних параметрах. Серед них:

- контроль рівня радіаційного фону;
- оцінка стану поверхневих і підземних вод;
- аналіз біорізноманіття та стану популяцій тварин і рослин;
- вивчення впливу транспортних мереж на довкілля;
- моніторинг шумового навантаження та вібрацій у міському середовищі.

Комплексність моніторингу дозволяє не лише фіксувати поточний стан, але й прогнозувати подальші зміни у міських екосистемах. Для цього дедалі частіше використовуються цифрові моделі, які поєднують результати польових спостережень з даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Достовірність інформації про стан довкілля значною мірою залежить від якості та різноманітності застосовуваних методів. Один метод рідко дає повну

картину, тому у практиці оцінювання екологічного стану міст використовують комплексний підхід, який поєднує кількісні та якісні методи.

Кількісні методи передбачають визначення точних концентрацій хімічних елементів або забруднювальних речовин (наприклад, вміст свинцю, кадмію, марганцю в ґрунті або пилових частинок у повітрі). Якісні методи дозволяють оцінити загальний стан екосистеми — наявність ознак деградації, ерозії, замулення водойм, втрату біорізноманіття [9].

Основним серед кількісних підходів є фізико-хімічний метод, який передбачає підготовку і дослідження проб природних об'єктів за допомогою сучасних технологій:

- газової та рідинної хроматографії для розділення складних сумішей;
- атомно-абсорбційної спектроскопії для виявлення металів;
- мас-спектрометрії для точного визначення складу забруднювачів.

Перед аналізом проби піддаються попередній обробці: висушуванню, прожарюванню до золи, фільтрації або випаровуванню — залежно від типу середовища.

Для оцінки екологічної стабільності території застосовується індекс екологічної стабільності (ІЕС), який відображає співвідношення стабільних та нестабільних елементів ландшафту:

$$IEC = \frac{(\sum S_i \times K_i)}{(\sum N_i \times K_i)}, \quad (2.1)$$

де:

S_i – площа стабільних угідь (ліси, водойми, болота, багаторічні насадження, сіножаті, пасовища);

N_i – площа нестабільних угідь (рілля, дороги, забудовані території тощо);

K_i – коефіцієнт екологічної стабільності для кожного виду угідь.

Коефіцієнти стабільності приймаються такими:

- ліси, болота, водойми – 1,0;
- багаторічні насадження – 0,7;

- сіножаті, пасовища – 0,5;
- рілля – 0,14;
- забудовані території – 0,05;
- дороги – 0,01.

Значення ІЕС дозволяє оцінити загальний рівень екологічної стійкості території. Чим воно вище, тим стабільніша екосистема. Для прикладу, при розрахунку ІЕС для міста Вінниця слід враховувати площі забудови, зелених насаджень, промислових зон і транспортної інфраструктури.

В умовах недостатньої кількості вихідних даних або обмеженої можливості прямих вимірювань застосовуються експертні методи оцінки стану довкілля. Вони базуються на використанні професійних суджень спеціалістів і математичних алгоритмів багатокритеріального вибору. До них належать метод парних порівнянь, метод фон Неймана–Моргенштерна, інтуїтивно-експертні оцінки, а також метод аналізу ієрархій. Зазначені підходи дозволяють оцінювати стан природних систем за умов невизначеності, однак потребують додаткової статистичної перевірки результатів [26, 29].

У сучасних дослідженнях дедалі більше поширення отримує комбінований підхід, що поєднує експертні методи з інструментальними вимірюваннями та аналітичними розрахунками. Це дає можливість підвищити точність оцінювання та зменшити похибку в інтерпретації результатів.

Таким чином, систематизація основних методів і інструментів аналізу стану довкілля є важливою складовою процесу екологічного оцінювання. Вона забезпечує отримання достовірних даних про рівень екологічної стабільності територій, дозволяє прогнозувати наслідки антропогенного впливу і сприяє прийняттю ефективних рішень у сфері екологічного управління.

2.1.2 Огляд актуальних методів моніторингу, прогнозування та управління змінами екосистем

Аналіз екологічної безпеки урбоекосистем проведено на прикладі міста Вінниця, що розташоване в центральній частині України на берегах річки

Південний Буг. Це місто є типовим прикладом урбанізованої території, де поєднуються промислові, житлові, транспортні та природні компоненти, а тому воно є зручним об'єктом для вивчення сучасних підходів до моніторингу та прогнозування екологічного стану.

Сьогодні моніторинг урбоекосистем є ключовим елементом екологічної політики сталого розвитку. Його метою є не лише спостереження за змінами в довкіллі, а й прогнозування екологічних процесів, щоб завчасно запобігти деградації природних ресурсів та підвищити якість життя населення. У цьому контексті важливу роль відіграють сучасні науково-технічні методи, які поєднують інструментальні вимірювання, математичне моделювання, біоіндикацію та просторово-аналітичні підходи.

Науковець Войтків П. С. у своїх працях виділяє два основні напрямки сучасного моніторингу екологічної безпеки: перший — це використання геоінформаційних систем для збирання, аналізу та візуалізації даних про стан довкілля, а другий — застосування математичних моделей для прогнозування змін екологічного стану урбоекосистем та своєчасного реагування на негативні тенденції [4]. Використання геоінформаційних технологій дозволяє створювати цифрові карти розподілу забруднень, визначати критичні зони впливу, проводити аналіз територіальної структури екосистем, а також моделювати динаміку природних процесів у просторі й часі.

У процесі моніторингу екологічного стану міста Вінниця важливе місце посідають біоіндикаторні дослідження. Одним із найбільш інформативних біоіндикаторів є флуктуаційна асиметрія листкових пластинок рослин, яка відображає рівень екологічного стресу. Цей показник виявляє реакцію рослин на забруднення повітря, ґрунту і води, а також на інші антропогенні впливи. Високі значення асиметрії свідчать про погіршення екологічного стану території. Аналіз таких біоіндикаторів дозволяє оцінювати ступінь забруднення окремих районів міста та визначати території, які потребують природоохоронних заходів.

Рослинність Вінниці представлена різноманітними луками, заплавами та болотистими ділянками, зокрема низинними луками, розташованими в заплавах Південного Бугу. На цих ділянках поширені види рослин, які виконують природоочисну функцію, але водночас є чутливими до забруднення. Серед них — біла мітлиця, різні види осок, ситник Жерарда, лучний лисохвіст, тимофіївка лучна та інші. Ці природні угруповання можна розглядати як важливі компоненти екологічної стабільності урбанізованого середовища (рис. 2.1).

У межах міста Вінниці стан рослинності суттєво залежить від рівня атмосферного та ґрунтового забруднення, щільності забудови, наявності зелених зон і рекреаційних територій. Обмеження площі зелених насаджень, ущільнення ґрунтів та зниження рівня зволоження ґрунтового шару негативно впливають на стійкість флори. Біоіндикаційні методи дозволяють отримувати узагальнені показники стану екосистем без великих фінансових витрат, що робить їх надзвичайно ефективними у міських дослідженнях.



Рисунок 2.1 – Флора заболочених берегів Південного Бугу [11]

Ґрунтовий покрив Вінниці характеризується значною різноманітністю (рис. 2.2, 2.3). На території міста переважають світло-сірі та сірі лісові ґрунти, чорноземи опідзолені, дерново-підзолисті, лучні та лучно-болотні ґрунти. Головними матеріалами для їх формування є лесоподібні суглинки, алювіальні та делювіальні відклади. Лісові ґрунти мають низький вміст гумусу (близько 1,7 %), тоді як опідзолені чорноземи є більш родючими, мають середній механічний склад і вміст гумусу понад 3 %. Значна різноманітність ґрунтів свідчить про стабільність екосистеми, проте на неї негативно впливають техногенні чинники, серед яких — забруднення важкими металами, засолення, ущільнення та зниження природної вологості.

Для ефективного контролю стану ґрунтів у міських межах доцільно поєднувати класичні лабораторні методи з використанням геоінформаційних технологій. Завдяки цьому стає можливим просторовий аналіз рівнів забруднення, визначення джерел впливу та виявлення тенденцій деградації ґрунтового покриву.

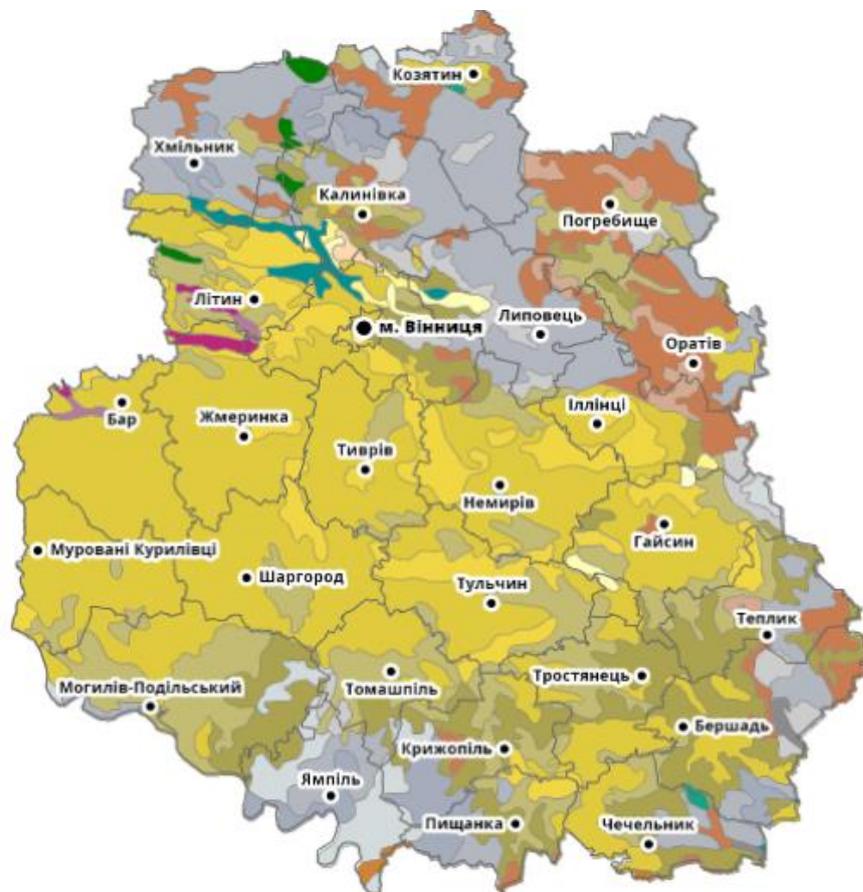


Рисунок 2.2 – Схема типів ґрунтів Вінницької області [21]

Дерново-підзолисті ґрунти

- Дерново-підзолисті ґрунти на давньоалювіальних та воднольодовикових відкладах, морені та лесовидних породах**
 - Дерново-прихованопідзолисті піщані та глинисто-піщані ґрунти (борові піски)
 - Дерново-слабо-і середньопідзолисті піщані та глинисто-піщані ґрунти
 - Дерново-середньо-і слабопідзолисті супіщані і суглинкові ґрунти
- Дерново-підзолисті оглеєні ґрунти на давньоалювіальних та воднольодовикових відкладах, морені та лесовидних породах**
 - Дерново-слабопідзолисті глейові піщані та глинисто-піщані ґрунти

Опідзолені ґрунти

- Опідзолені ґрунти переважно на лесових породах**
 - Ясно-сірі опідзолені ґрунти
 - Сірі опідзолені ґрунти
 - Темно-сірі опідзолені ґрунти
 - Черноземи опідзолені
- Опідзолені оглеєні ґрунти переважно на лесових породах**
 - Ясно-сірі і сірі опідзолені оглеєні ґрунти
 - Темно-сірі опідзолені оглеєні ґрунти
 - Черноземи опідзолені оглеєні
- Реградовані ґрунти**
 - Темно-сірі та сірі реградовані ґрунти
 - Черноземи реградовані

Черноземи

- Черноземи неглибокі лісостепові на лесових породах**
 - Черноземи неглибокі слабогумусовані та малогумусні
- Черноземи глибокі на лесових породах**
 - Черноземи глибокі слабогумусовані
 - Черноземи глибокі малогумусні
 - Черноземи глибокі малогумусні карбонатні
 - Черноземи глибокі малогумусні вилуговані
- Черноземи на щільних глинах**
 - Черноземи солонцюваті на щільних глинах
- Черноземні глинисто-піщані та супіщані ґрунти**
 - Черноземні глинисто-піщані та супіщані ґрунти
- Лучно-черноземні ґрунти**
 - Лучно-черноземні ґрунти
- Лучні ґрунти**
 - Лучні та черноземно-лучні ґрунти

Болотні ґрунти, торфовища

- Лучно-болотні ґрунти на делювіальних та алювіальних відкладах**
 - Лучно-болотні ґрунти
- Болотні та торфувато-болотні ґрунти на різних породах**
 - Болотні та торфувато-болотні ґрунти
- Торфовища**
 - Торфовища низинні та торфопо-болотні ґрунти
- Дернові ґрунти**
 - Дернові карбонатні ґрунти переважно на елювії щільних карбонатних порід

Рисунок 2.3 – Ґрунтові особливості міста м. Вінниця [21]

Окрему увагу під час оцінки екологічного стану міста слід приділяти рельєфу, оскільки він значною мірою визначає розподіл водних потоків, напрямки вітрів, мікроклімат і структуру міської забудови. Вінниця розташована на Подільській височині, рельєф якої сформувався під дією як зовнішніх (ерозійних, флювіальних), так і внутрішніх процесів (суфозійних та біогенних). У межах міста спостерігаються долини, балки, яри, невеликі підвищення та знижені ділянки, що формують складну гідрологічну мережу (рис. 2.4).

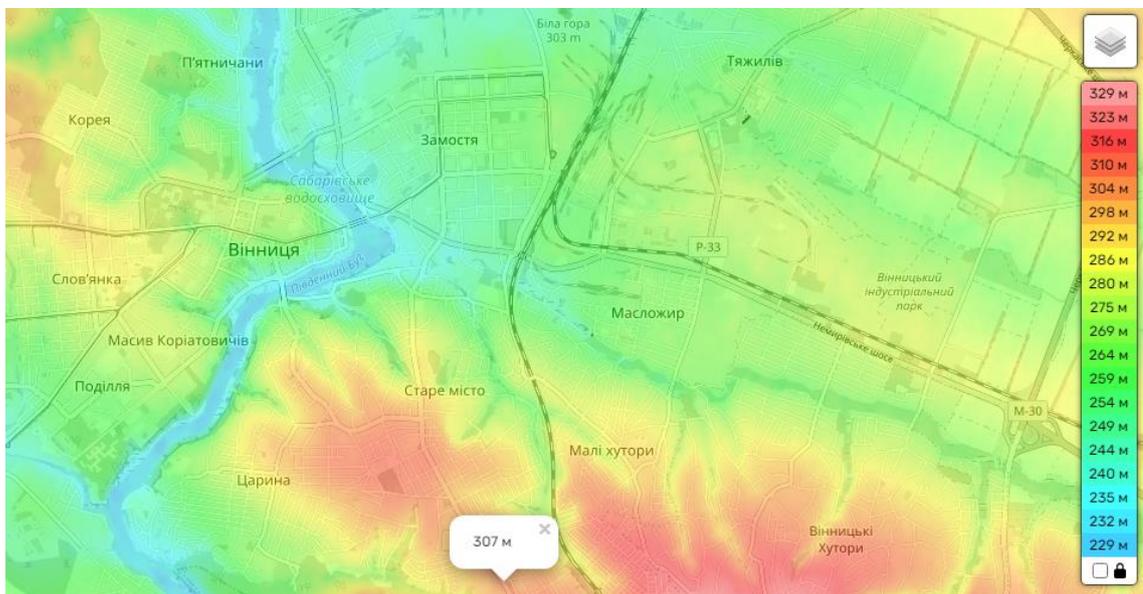


Рисунок 2.4 – План міста Вінниця за рельєфом [33]

Вплив рельєфу на екологічний стан полягає у тому, що підвищення сприяють ерозії, а зниження — накопиченню забруднюючих речовин у ґрунтах і воді. Тому під час планування екологічних заходів важливо враховувати не лише типи ґрунтів і рослинність, але й морфологічні особливості місцевості.

Сучасні дослідження показують, що для підвищення ефективності управління екологічною безпекою міста необхідно поєднувати спостереження, моделювання та прогнозування екологічних процесів. У цьому контексті особливе значення мають прогнозні моделі, які дають змогу оцінити можливі наслідки кліматичних змін, забруднення атмосферного повітря, водних

ресурсів і ґрунтів, а також розробити адаптаційні стратегії для міських екосистем.

Пріоритетними напрямками прогнозування екологічної безпеки міста Вінниця є:

- моделювання впливу кліматичних змін на стан екосистем і розробка адаптаційних заходів;
- оцінка ризиків забруднення повітря, води та ґрунтів;
- прогнозування змін у структурі міських ландшафтів, зокрема складу зелених насаджень і біорізноманіття;
- оцінювання можливих наслідків техногенних аварій або воєнних дій для довкілля та розробка заходів для мінімізації їхнього впливу.

Застосування сучасних методів моніторингу і прогнозування дозволяє створювати ефективну систему управління станом міських екосистем. Вона поєднує класичні методи спостереження, автоматизовані системи збору даних, біоіндикаційні дослідження, лабораторні аналізи та просторове моделювання. Це забезпечує комплексний підхід до охорони навколишнього середовища та сприяє сталому розвитку міста [10].

Отже, узагальнюючи, можна зазначити, що сучасні підходи до моніторингу, прогнозування та управління екологічною безпекою урбоекосистем на прикладі м. Вінниця ґрунтуються на інтеграції новітніх технологій з екологічними методами аналізу. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти небезпечні тенденції, оцінювати рівень екологічного ризику, а також розробляти ефективні заходи для збереження природного середовища, підтримання екологічної рівноваги та забезпечення комфортних умов життя населення.

2.2 Використання геоінформаційних систем та моделювання в оцінюванні екологічної безпеки урбоєкосистем

Міське середовище сучасного типу становить надзвичайно складну антропогенну систему, яка за своєю природою, структурою і функціонуванням істотно відрізняється від природних екосистем. Воно формується під впливом широкого спектра факторів — техногенних, соціально-економічних, демографічних і природно-кліматичних. На відміну від природних ландшафтів, міська екосистема має штучно створений баланс, де процеси самоочищення та відновлення перебувають під постійним навантаженням. Характерними ознаками урбанізованого простору є підвищений рівень фізичних впливів (вібрація, електромагнітні поля, акустичний шум), зростання концентрацій хімічних забруднювачів, поява нових типів мікробіологічних агентів та навіть феномен інформаційного перевантаження, який розглядається як специфічна форма антропогенного впливу на довкілля.

Комплекс цих проблем є прямим наслідком господарської та транспортної діяльності людини, нераціонального використання природних ресурсів, високої щільності населення й зростання енергоспоживання. Найбільш загостреними екологічними проблемами сучасних міст в Україні є: збереження рослинного покриву і ґрунтів, забруднення атмосферного повітря, неефективне поводження з відходами, нестача якісних джерел питної води, деградація зелених зон, а також зниження рекреаційного потенціалу урбанізованих територій. Стан кожного з цих компонентів безпосередньо впливає на загальний екологічний баланс і визначає рівень комфортності проживання населення.

Місто є ареалом глибоко зміненої природи, і ступінь цих змін визначається низкою факторів: географічним положенням, топографічними умовами, щільністю забудови, ефективністю місцевої влади у сфері екологічного управління та рівнем екологічної свідомості мешканців. Основною метою управління міським середовищем є забезпечення екологічної стійкості урбоєкосистеми, створення сприятливих умов для життя та розвитку

людини за мінімізації шкоди для довкілля. Для досягнення цієї мети необхідно впроваджувати комплексні стратегії, засновані на науково обґрунтованих методах контролю, оцінки, прогнозування та просторового планування екологічних процесів.

Важливою частиною такого підходу є використання геоінформаційних технологій та математичного моделювання, що дозволяють інтегрувати результати спостережень і забезпечити постійний моніторинг екологічних показників. Використання геоінформаційних систем (ГІС) у дослідженні міських екосистем дає можливість формувати багаторівневі бази даних, здійснювати просторовий аналіз, виявляти закономірності розподілу забруднень та прогнозувати їх динаміку. Саме інтеграція ГІС-технологій із даними дистанційного зондування Землі та результатами лабораторних вимірювань є сьогодні основою науково обґрунтованого екологічного моніторингу.

Для кількісної оцінки загального рівня забруднення довкілля використовується сумарний коефіцієнт комплексного забруднення, який враховує внесок кожного з домішкових компонентів. Його розраховують за формулою:

$$K_k = \sum i \frac{C_i}{GDK_i}, \quad (2.2)$$

де C_i — фактична концентрація i -ї домішки, GDK_i — гранично допустима концентрація для цієї речовини. Отримане значення коефіцієнта дозволяє виявити території з найвищим екологічним навантаженням і оцінити динаміку забруднення у часі.

Для прикладу, за даними спостережень у місті Вінниця було проаналізовано максимальні разові концентрації основних забруднювачів атмосферного повітря у вересні 2022 року порівняно з аналогічним періодом 2021 року (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Концентрації шкідливих домішок у повітрі м. Вінниця

Домішки	Номери ПСЗ	По місту	2022 рік	2021 рік
Завислі речовини	1	2	0,6	0,6
Діоксид сірки	0	0	0	0
Оксид вуглецю	0,2	0,2	0,2	0,3
Діоксид азоту	1,3	1,8	1,8	1,4
Фтористий водень	1,0	1,0	1,0	1,1
Аміак	Н/Д	0,2	0,2	0,1
Формальдегід	0,5	Н/Д	0,5	0,3

У результаті дослідження встановлено, що рівень завислих речовин залишився стабільним на рівні 0,6 ГДК; концентрація діоксиду сірки становила 0 ГДК в обидва роки, що вказує на відсутність перевищень за цим показником. Оксид вуглецю знизився з 0,3 до 0,2 ГДК, тоді як діоксид азоту навпаки — зріс із 1,4 до 1,8 ГДК, перевищуючи нормативи. Концентрація фтористого водню залишалася близькою до граничного значення (1,0 ГДК), а аміак збільшився з 0,1 до 0,2 ГДК. Особливу увагу слід звернути на формальдегід, рівень якого зріс із 0,3 до 0,5 ГДК, що свідчить про посилення хімічного навантаження у повітряному басейні міста.

Порівняльний аналіз показників виявив як позитивні зміни (зниження рівня оксиду вуглецю), так і негативні тенденції (зростання концентрацій азотистих сполук і формальдегіду). Узагальнений індекс забруднення зріс із 6,6 до 9,13 умовних одиниць, що потребує посилення системи моніторингу. Головними джерелами забруднення у Вінниці залишаються викиди автотранспорту, а також деяких об'єктів теплоенергетики. Серед типових домішок, які формують екологічний фон, переважають пил, оксиди азоту, оксид вуглецю, фенол, формальдегід, бензопірен та аміак.

Проблеми водного середовища також мають першорядне значення для забезпечення екологічної безпеки міста. Згідно з офіційними статистичними даними, у 2021 році у водні об'єкти Вінницької області було скинуто 72,12 млн

м³ стічних вод, з яких 1,23 млн м³ класифіковано як забруднені, 40,45 млн м³ — нормативно очищені без потреби у додатковій обробці, 30,44 млн м³ — після проведення очищення відповідно до вимог, а некатегоровані скиди не реєструвались [14].

Структурний аналіз джерел скидів свідчить, що близько 98 % забруднених вод припадає на комунальний сектор, тоді як промисловість становить лише 2 %. Комунальні підприємства скинули близько 1,18 млн м³ стоків, тоді як частка промислових підприємств становила 0,05 млн м³. Загальний обсяг стічних вод, що пройшли через очисні споруди області, перевищив 32 млн м³ на рік. Ці дані демонструють, що саме житлово-комунальна інфраструктура є головним напрямом, де необхідно вдосконалювати технології очищення та контролю.

До значних джерел забруднення атмосферного повітря у міських межах належать підприємства металургійної, хімічної, енергетичної та будівельної галузей. Крім того, суттєвий внесок роблять районні опалювальні котельні, які функціонують на твердому або рідкому паливі. За умовами розсіювання виділяють високі джерела (із висотою труб понад 50 м) та низькі (менше 50 м). Вони різняться за фізичними параметрами — температурою викидів, швидкістю потоку, об'ємом і хімічним складом газопилових сумішей. Якщо температура димових газів перевищує 500 °С, такі джерела класифікуються як нагріті, а за нижчих температур — як холодні.

Усі джерела поділяють на природні та антропогенні. До природних належать виверження вулканів, лісові пожежі, пилові бурі, ерозійні процеси та розкладання органічних решток. Вони здатні істотно змінювати склад атмосфери навіть на регіональному рівні, спричиняючи короткочасні зміни прозорості повітря й хімічного складу опадів. Антропогенні ж джерела пов'язані з діяльністю промислових підприємств, теплоенергетики, транспорту, систем опалення, сільського господарства та побутового сектору. Їхній внесок є визначальним у структурі забруднення урбанізованого повітря.

За результатами аналізу даних онлайн-платформи SaveEcoBot, що відстежує випадки лісових пожеж і стан повітря, у 2022–2023 роках на

території Вінницької області надзвичайних екологічних подій не зафіксовано, що свідчить про стабільність природних процесів (рис. 2.5).

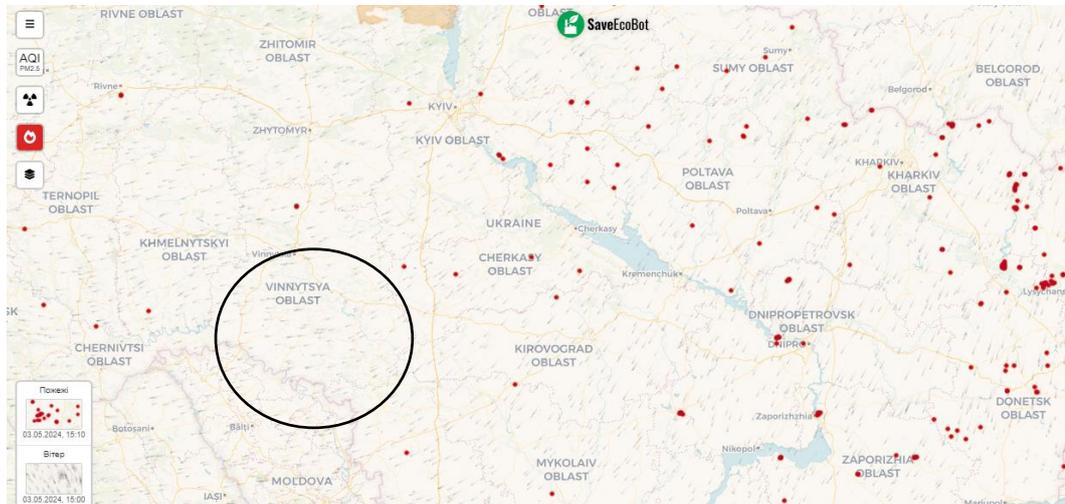


Рисунок 2.5 – Просторова прив’язка пожеж і напрямків вітру [22]

Важливим стаціонарним джерелом техногенного навантаження на довкілля Вінниччини є Ладизинська теплова електростанція (ТЕС) — один із найбільших енергетичних об’єктів центрального регіону України. Розташована на березі річки Південний Буг, станція забезпечує електроенергією значну частину центральної України та має енергозв’язки з Молдовою. Збудована у 1968–1972 роках, Ладизинська ТЕС оснащена шістьма потужними пилувугільними блоками по 300 МВт кожен, що сумарно формує встановлену потужність понад 1800 МВт. Попри стратегічне значення у національній енергосистемі, об’єкт є суттєвим джерелом забруднення повітря через характер спалюваного палива [1].

Викиди з території станції здійснюються через дві труби висотою 250 метрів, що сприяє широкому поширенню домішок у приземних шарах атмосфери на десятки кілометрів. Основні продукти згоряння включають вуглекислий газ, оксиди сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x), золу та сажу. Щорічно концентрація вуглекислого газу у повітрі регіону збільшується приблизно на 0,25 %, що є небезпечним показником з точки зору парникового ефекту. Додатково спостерігаються підвищені рівні кислотних оксидів, які за певних

метеоумов сприяють утворенню кислих дощів, що негативно впливають на ліси, сільськогосподарські культури та будівельні матеріали.

Хімічний склад золи ТЕС залежить від якості вугілля та умов горіння і містить оксиди кремнію (SiO_2), кальцію (CaO), магнію (MgO), натрію (Na_2O), а також слідові кількості токсичних елементів — ванадію, свинцю, миш'яку, ртуті та кадмію. Частина з них має канцерогенні властивості, а деякі сполуки характеризуються радіоактивністю природного походження. З огляду на тривалий час перебування аерозольних частинок у повітрі (від кількох діб до кількох тижнів) вони здатні переміщуватись на значні відстані, впливаючи на якість атмосферного повітря не лише в зоні розташування ТЕС, а й у сусідніх районах [8].

Для контролю стану повітряного басейну міста Вінниця застосовуються дані онлайн-сервісів моніторингу якості повітря, зокрема системи SaveEcoBot, яка відображає актуальні показники концентрацій шкідливих речовин у режимі реального часу (рис. 2.6). Сервіс інтегрує дані як з державних, так і з громадських сенсорних станцій.

Згідно з даними системи за травень 2024 року, концентрації дрібнодисперсних частинок становили:

- ☁ PM_{10} — 6,6 $\text{мкг}/\text{м}^3$;
- ☁ $\text{PM}_{2.5}$ — 8,6 $\text{мкг}/\text{м}^3$;
- ☁ PM_{1} — 9,7 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Такі показники відповідають санітарним нормам та свідчать про відносно чисте повітря у період спостереження. Водночас метеорологічні умови — 🌡️ висока температура (33,3 °C), 💧 низька відносна вологість (26 %) і 🌀 понижений атмосферний тиск (979,5 гПа) — створювали передумови для утворення застійних зон та тимчасового накопичення забруднювачів у приземному шарі повітря.

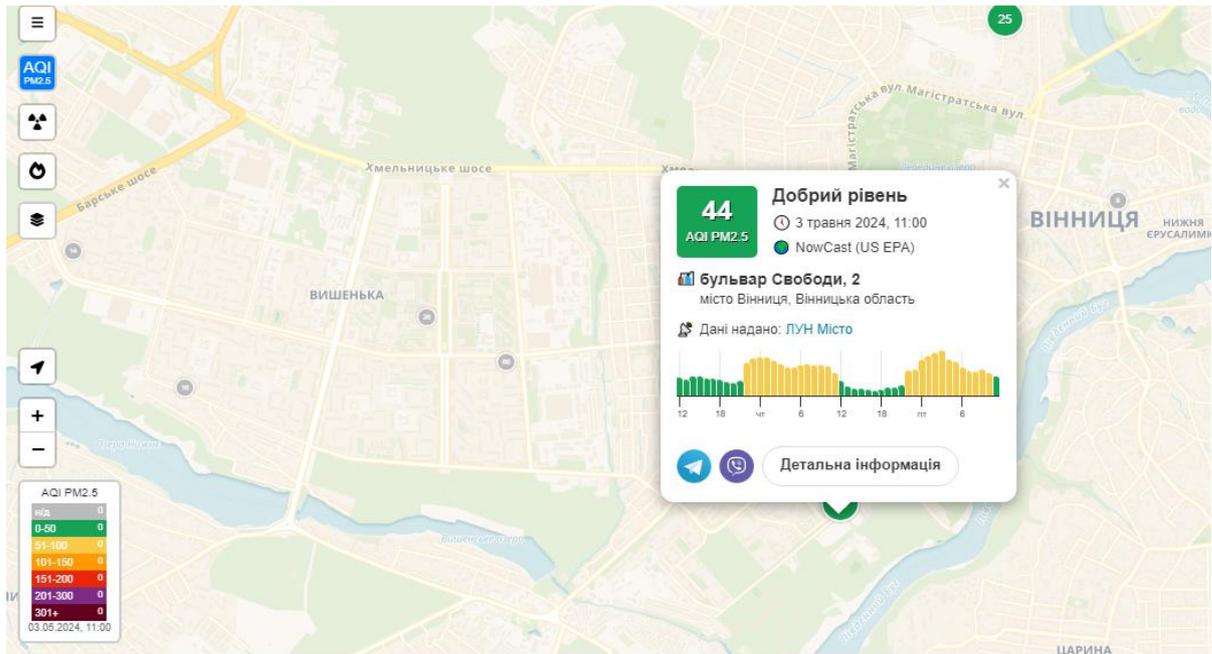


Рисунок 2.6 – Стан повітря м. Вінниця за рівнем забруднення [22]

Вінниця належить до регіонів із помірно-континентальним кліматом, де чітко виражені сезонні коливання температури та вологості. Максимальна висота Сонця взимку становить $17\text{--}28^\circ$, влітку — $54\text{--}63^\circ$, що визначає відповідно короткі (8–9 годин) і довгі (15–16 годин) дні. Радіаційний баланс у січні становить $0,05 \text{ кВт/м}^2$, а в червні — $0,57 \text{ кВт/м}^2$. У зимовий період переважає від’ємний баланс, що зумовлює низькі температури повітря та можливість утворення стійких шарів інверсії, які перешкоджають розсіюванню домішок.

Середній атмосферний тиск коливається в межах 980–986 гПа, а середньорічна температура повітря становить $7,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Найнижчі середньомісячні температури фіксуються у січні ($-5,6 \text{ }^\circ\text{C}$), а найвищі — у липні ($+18 \text{ }^\circ\text{C}$). Такі кліматичні характеристики безпосередньо впливають на процеси дифузії, конвекції та концентрації шкідливих речовин у повітрі, що має бути враховано при розробленні моделей розсіювання забруднень [8].

З метою детального аналізу екологічного стану території м. Вінниця окремо досліджено район Царина, який характеризується низькою щільністю транспортних потоків і віддаленістю від промислових зон (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Районна карта мікрорайону Царина у Вінниці [19]

Результати лабораторних досліджень, проведених екологічною лабораторією ТОВ «Вінекософт», показали, що концентрації шкідливих речовин у повітрі не перевищують нормативів, встановлених наказом МОЗ України №52 від 14.01.2020 року «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць». Додатково стан атмосферного повітря підтверджується Довідкою про фонові концентрації, наданою Вінницьким центром гідрометеорології (№992-03.2-08/330.1 від 11.11.2022 р.) [19]. Ці результати свідчать про відповідність показників якості повітря встановленим санітарним нормам та відсутність істотного ризику для здоров'я населення.

Таким чином, результати досліджень дозволяють зробити висновок, що для Вінниці характерне комбіноване джерело екологічних навантажень: поєднання транспортних, енергетичних, комунальних і побутових викидів. Використання геоінформаційних систем, сучасних моделей розсіювання забруднювачів, дистанційного зондування Землі та інструментального моніторингу створює потужну аналітичну базу для управління екологічною безпекою міста.

Моделювання, засноване на геопросторових даних, дозволяє прогнозувати розповсюдження шкідливих речовин, визначати критичні точки накопичення домішок і оптимізувати розміщення зелених зон, транспортних розв'язок і рекреаційних територій. Поєднання таких інструментів із результатами біоіндикаційних досліджень і гідрохімічного аналізу дає змогу формувати комплексні карти ризиків і приймати управлінські рішення, спрямовані на зменшення антропогенного навантаження.

У перспективі розвиток інтегрованих інформаційних систем екологічного моніторингу дозволить здійснювати постійне відстеження параметрів довкілля в режимі реального часу, прогнозувати екологічні ризики й оперативно реагувати на зміни стану середовища. Такі підходи відповідають цілям сталого розвитку, спрямованим на забезпечення гармонії між людиною та природою, раціональне використання ресурсів і підвищення екологічної безпеки урбанізованих територій [35].

Отже, можна підсумувати, що використання геоінформаційних технологій, математичного моделювання та аналітичних методів є основою сучасної системи дослідження екологічної безпеки урбоекосистем. Їх впровадження у практику міського управління, зокрема у Вінниці, забезпечує можливість комплексного аналізу стану природних ресурсів, визначення рівня ризиків, виявлення причин забруднення і формування ефективних стратегій сталого розвитку, орієнтованих на збереження навколишнього середовища та покращення якості життя мешканців.

2.3 Прикладні аспекти впровадження заходів з екологічної безпеки у міському середовищі

Управління екологічною безпекою є одним із ключових напрямів сучасної державної політики. Воно поєднує адміністративно-правові, економічні, наукові та організаційні заходи, спрямовані на зменшення ризиків, що виникають унаслідок господарської діяльності людини. Мета цієї системи полягає не лише у збереженні стабільності довкілля, а й у створенні

сприятливих умов для соціально-економічного розвитку територій без порушення природної рівноваги.

Забезпечення належного рівня екологічної безпеки — це комплексне завдання, до якого залучаються як державні органи, так і місцеве самоврядування, підприємницькі структури, громадські об'єднання та міжнародні організації. Вони спільно формують умови для збалансованого розвитку міст, координують дії у сфері природокористування, здійснюють контроль за дотриманням екологічних норм і стандартів. Важливо, щоб державні рішення спиралися на науково обґрунтовані дані моніторингу, а громадськість мала можливість брати участь у їх реалізації.

Один із практичних напрямів забезпечення екологічної безпеки полягає у регулярному моніторингу стану міського середовища. Систематичне спостереження за атмосферним повітрям, водними ресурсами, ґрунтами та зеленими зонами дозволяє вчасно фіксувати зміни, аналізувати тенденції та прогнозувати можливі ризики. З цією метою активно застосовуються лабораторні дослідження, аналітичні розрахунки та геоінформаційні технології, що дають змогу отримувати просторову картину екологічного стану міста [3].

Велике значення має розвиток екологічної освіти та просвітництва. Підвищення рівня екологічної свідомості населення сприяє формуванню культури ощадливого використання ресурсів, зменшенню утворення відходів та розповсюдженню практик сортування. В освітніх закладах і засобах масової інформації доцільно розвивати теми раціонального природокористування, збереження біорізноманіття та впровадження «зелених» технологій у побуті.

Окремим напрямом практичної діяльності є перехід на екологічно чисті джерела енергії. У міських умовах це може включати використання сонячних панелей, систем енергозбереження в громадських будівлях, розвиток електротранспорту та модернізацію теплових мереж. Такі кроки дозволяють зменшити викиди вуглецю, поліпшити якість повітря та знизити залежність міста від традиційних енергоносіїв.

Важливим чинником поліпшення екологічного стану міста є озеленення територій. Створення нових парків і скверів, висадка дерев уздовж транспортних артерій, облаштування зелених дахів і фасадів сприяють не лише покращенню мікроклімату, а й підвищенню психологічного комфорту мешканців. Зелені насадження виступають природними фільтрами для пилу, чадного газу та шуму, що особливо важливо для густонаселених районів.

Юридичну основу екологічної політики становить законодавство України — Закони «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про екологічну експертизу», «Про відходи», «Про охорону атмосферного повітря» тощо. Важливим напрямом розвитку є гармонізація національної нормативної бази з європейськими стандартами та директивами, що регулюють якість повітря, управління відходами, водні ресурси та охорону природи.

Для оцінки ефективності екологічних заходів використовуються спеціальні показники сталого розвитку, які відображають динаміку стану довкілля, соціальні наслідки та економічну доцільність природоохоронної діяльності. Серед них — рівень забруднення атмосферного повітря, обсяги утворення та утилізації відходів, показники споживання енергії, води, а також рівень захворюваності населення. Проте більшість цих індикаторів відображають лише окремі аспекти, тому актуальним є формування інтегральних індексів екологічної безпеки, що враховують комплекс взаємозв'язаних факторів.

На практиці реалізація природоохоронних програм стикається з низкою обмежень: дефіцитом фінансових ресурсів, застарілими технологіями, слабкою координацією між установами, а подекуди й недостатньою увагою з боку місцевої влади. Подолати ці труднощі можливо через залучення інвестицій, міжнародних грантів, міжрегіональну співпрацю та активізацію громадських ініціатив [12].

Зрештою, досягнення стабільного екологічного балансу у містах можливе лише за умови поєднання зусиль усіх учасників процесу — держави,

бізнесу, науки та населення. Кожен із них відіграє свою роль у зменшенні антропогенного навантаження та впровадженні принципів сталого розвитку. Лише такий підхід забезпечить довготривалу екологічну стабільність, чисте повітря, безпечну воду й комфортне середовище для життя майбутніх поколінь.

3 ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

3.1 Вплив громадських ініціатив та участі населення у формуванні безпечного екологічного простору міста

Громадські ініціативи є рушійною силою у процесі формування безпечного екологічного простору сучасного міста. Активна участь населення у природоохоронній діяльності дозволяє не лише підвищити якість навколишнього середовища, а й створити дієвий механізм впливу на екологічну політику місцевої влади. В умовах урбанізації та високого техногенного навантаження саме громадські рухи здатні забезпечити баланс між інтересами розвитку міста та необхідністю збереження природного середовища.

Громадські організації, екологічні об'єднання, студентські спільноти й волонтерські рухи проводять незалежний моніторинг стану довкілля, аналізують якість атмосферного повітря, води та ґрунтів, а також оцінюють ефективність заходів, які впроваджуються органами влади. Вони активно поширюють інформацію серед мешканців, сприяють формуванню екологічної свідомості, проводять акції з озеленення, сортування відходів, очищення берегів річок і парків. Такі ініціативи не лише покращують стан навколишнього середовища, але й об'єднують громаду навколо спільних екологічних цілей.

Зростання громадської участі у сфері екологічного управління є ознакою становлення екологічної демократії — системи, де кожен мешканець має право впливати на рішення, що стосуються якості довкілля. Завдяки петиціям, відкритим слуханням, онлайн-платформам та соціальним мережам громадяни мають змогу відстоювати свої екологічні інтереси, контролювати використання природних ресурсів та домагатися прозорості у діяльності підприємств-забруднювачів.

Забруднення повітря залишається одним із найгостріших викликів для міських урбоекосистем. Воно виникає як через природні процеси (пиллові бурі, пожежі, виверження вулканів), так і внаслідок антропогенної діяльності. Проте саме людська діяльність є основним чинником погіршення якості повітря. Промислові підприємства, транспорт, системи опалення, спалювання побутових відходів — усе це призводить до накопичення в атмосфері шкідливих речовин, серед яких оксиди азоту, діоксид сірки, чадний газ, пиллові частинки та леткі органічні сполуки [16].

Масове використання хімічних добрив і засобів захисту рослин у сільському господарстві, розробка надр і діяльність гірничих підприємств також негативно впливають на стан атмосферного повітря. Терикони, відвали та відкриті розрізи утворюють пиллові зони, а продукти згоряння вугілля й нафти забруднюють повітря токсичними сполуками. Ці процеси особливо небезпечні для густонаселених міських територій, де концентрація забруднюючих речовин перевищує гранично допустимі норми.

У місті Вінниця, як і в інших великих містах України, громадські ініціативи відіграють важливу роль у виявленні та усуненні екологічних загроз. Місцеві волонтерські рухи здійснюють прибирання зелених зон, сортування сміття, популяризують використання екотранспорту, проводять акції зі зменшення споживання пластику. Ці дії мають не лише практичне, але й символічне значення — вони демонструють готовність громади брати на себе відповідальність за екологічний стан свого міста.

Урбанізаційні процеси впливають на стан біорізноманіття, мікроклімат і здоров'я населення. Зміна структури міського простору, ущільнення забудови та скорочення зелених насаджень сприяють утворенню теплових островів і підвищенню температури в центральних районах. Громадські проекти з озеленення та створення парків на місці занедбаних територій допомагають зменшити ці ефекти, відновити природну циркуляцію повітря та покращити якість життя мешканців.

Вплив населення на формування екологічної політики проявляється також через участь у місцевих екологічних програмах, обговореннях генеральних планів забудови, публічних слуханнях щодо оцінки впливу на довкілля (ОВД). Таке залучення громадськості дає змогу враховувати екологічні пріоритети при ухваленні управлінських рішень.

Проблеми урбанізації можна умовно поділити на кілька груп:

- екологічні проблеми — надмірне енергоспоживання, зменшення площ зелених насаджень, забруднення повітря та води;
- соціально-економічні — підвищення рівня стресу, зростання кількості захворювань і нерівності між групами населення;
- техногенні — аварії, промислові ризики, викиди токсичних речовин;
- інфраструктурні — перевантаження транспортних мереж і неефективне управління відходами.

Вирішення цих проблем неможливе без активної участі громади. Громадські ініціативи стають посередником між владою, бізнесом і жителями, формуючи культуру співвідповідальності за стан довкілля. Коли мешканці усвідомлюють свій вплив на довкілля, вони стають рушійною силою екологічних змін, що веде до формування сталого, здорового та безпечного міського простору.

3.2 Аналіз реалізованих організаційно-технічних заходів у межах міських систем для підвищення екологічної безпеки

Підвищення рівня екологічної безпеки в межах міських систем є одним із ключових завдань сучасного урбанізованого розвитку. Міста концентрують значну кількість населення, промислових підприємств, транспортних мереж і комунікацій, що призводить до зростання антропогенного навантаження на природне середовище. Для мінімізації цього впливу необхідно впроваджувати цілеспрямовані організаційно-технічні заходи, спрямовані на моніторинг, контроль і відновлення екологічної рівноваги.

Одним із першочергових напрямів є створення ефективної системи моніторингу стану навколишнього середовища. У більшості українських міст, зокрема у Вінниці, здійснюється регулярне спостереження за показниками якості повітря, води, ґрунтів та шумового навантаження. Отримані результати дозволяють виявляти перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин і простежувати динаміку змін у часі. Сучасні методи спостережень передбачають використання автоматизованих станцій контролю, сенсорних мереж і геоінформаційних систем (ГІС). Важливою тенденцією є відкритість таких даних для громадськості через онлайн-платформи та офіційні сайти екологічних служб [17].

Не менш значущим напрямом екологічної політики є вдосконалення нормативно-правового забезпечення. Державні та місцеві органи влади розробляють програми сталого розвитку, стратегії скорочення викидів парникових газів, заходи з енергозбереження та використання альтернативних джерел енергії. Вагоме значення має гармонізація українського законодавства з вимогами Європейського Союзу, зокрема щодо якості атмосферного повітря, управління відходами, очищення стічних вод та охорони водних ресурсів.

Організаційно-технічні заходи також охоплюють створення спеціалізованих структур і підрозділів, які координують діяльність у сфері екологічної безпеки. Це можуть бути міські департаменти екології, служби моніторингу довкілля, комісії з питань надзвичайних ситуацій природного чи техногенного характеру. Такі інституції відповідають за збір і аналіз екологічних даних, розробку планів дій у разі аварій, а також здійснення контролю за дотриманням природоохоронного законодавства на місцевому рівні.

Важливою складовою системи управління є підготовка до надзвичайних екологічних ситуацій. Для цього розробляються плани цивільного захисту, визначаються потенційно небезпечні зони, проводяться навчання та тренування з евакуації населення. Наявність чітко відпрацьованих алгоритмів

взаємодії між службами дозволяє ефективно мінімізувати наслідки аварій, техногенних катастроф і стихійних лих.

Окремої уваги заслуговує модернізація інженерної та комунальної інфраструктури. Вона передбачає реконструкцію очисних споруд, оновлення водопровідно-каналізаційних систем, будівництво нових очисних станцій, перехід на енергоефективні технології у транспорті та житлово-комунальному господарстві. У Вінниці, наприклад, реалізуються проєкти модернізації систем тепlopостачання та водовідведення за підтримки міжнародних фінансових організацій, що сприяє підвищенню екологічної ефективності міської інфраструктури.

Не менш важливим напрямом є управління відходами та розвиток системи роздільного збору сміття. У містах активно впроваджуються станції сортування, пункти прийому вторинної сировини та контейнери для роздільного збору пластику, скла, паперу й органічних відходів. У Вінниці діє міська програма «Чисте місто», яка спрямована на зменшення навантаження на полігони, підвищення рівня переробки та повторного використання матеріалів [18].

Організаційно-технічні заходи включають і розширення зелених зон, створення екопарків, висадження дерев і формування зелених дахів. Такі рішення не лише покращують естетичний вигляд міського середовища, але й виконують природоохоронну функцію — очищають повітря, знижують рівень шуму та регулюють мікроклімат.

Важливу роль відіграє і просвітницька робота серед населення. Підвищення рівня екологічної свідомості здійснюється через освітні програми, інформаційні кампанії, екологічні фестивалі та волонтерські ініціативи. Формування культури екологічної відповідальності серед громадян створює передумови для сталих змін у поведінці та посилює ефективність технічних і правових заходів.

Разом із тим, впровадження екологічних заходів стикається з певними труднощами — нестачею фінансування, застарілою інфраструктурою, недостатньою координацією між державними та місцевими структурами. Розв'язання цих проблем можливе завдяки залученню міжнародних грантів, розвитку партнерств між владою, бізнесом і громадськістю, а також інтеграції принципів сталого розвитку в систему місцевого управління.

Отже, реалізовані в українських містах організаційно-технічні заходи демонструють поступ у напрямі підвищення екологічної безпеки. Проте для досягнення стабільних результатів потрібен системний підхід, який поєднує моніторинг, технологічні інновації, правове регулювання, екологічну освіту та громадську участь. Лише комплексна взаємодія цих елементів може забезпечити сталий розвиток міських екосистем і підвищити якість життя населення.

4 СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

4.1 Розроблення стратегій екологічного управління урбоекосистеми

Розроблення ефективних стратегій екологічного управління є одним із ключових напрямів сталого розвитку сучасних міст. Урбоекосистема поєднує природне й антропогенне середовище, тому потребує зваженого підходу, який враховує взаємозв'язки між економічними, соціальними та екологічними чинниками.

Управління такою складною системою повинно ґрунтуватися на принципах екологічної рівноваги, раціонального використання ресурсів і мінімізації негативного впливу людини на довкілля.

Одним із пріоритетних напрямів стратегічного екологічного управління є перехід від фрагментарного, галузевого підходу до комплексного, міжсекторального управління. Це означає, що питання охорони довкілля повинні інтегруватися в усі сфери міської політики — промисловість, енергетику, транспорт, будівництво, управління відходами та благоустрій. Такий підхід дозволяє збалансувати інтереси міста, громади та бізнесу, сприяючи гармонійному розвитку територій [24].

Стратегії екологічного управління повинні базуватися на сучасних принципах “зеленої економіки”, що передбачає оптимізацію споживання ресурсів, скорочення викидів і повторне використання матеріалів. Важливим є впровадження енергоефективних технологій, підвищення ролі відновлюваних джерел енергії, розвиток екологічного транспорту та створення зелених зон, які покращують якість повітря й мікроклімат міста.

Ключовим завданням для органів місцевого самоврядування є створення системи управління, яка враховує стан усіх компонентів міського середовища — від водних ресурсів і ґрунтів до шумового забруднення. Таке управління повинно базуватися на достовірних даних екологічного моніторингу та

постійному оновленні стратегічних документів відповідно до змін у середовищі.

Розроблення стратегій екологічного управління потребує дотримання кількох базових принципів.

По-перше, необхідно використовувати системний підхід — розглядати місто як цілісну природно-техногенну систему, де будь-яке втручання в один елемент може впливати на інші.

По-друге, важливо оцінювати екосистемні послуги — тобто ті вигоди, які люди отримують від природи: чисте повітря, питну воду, тінь від зелених насаджень, рекреаційні можливості.

По-третє, управління повинно бути адаптивним — гнучко реагувати на зміни клімату, технологій і демографічних процесів.

Велике значення має басейновий принцип управління, коли екологічні заходи здійснюються не лише в межах міста, а й у його водозбірній зоні. Це дозволяє ефективно регулювати використання водних ресурсів, запобігати забрудненню річок і зберігати природні території, що мають важливе значення для відновлення екосистем.

Не менш важливим є залучення громадськості, бізнесу та науковців до формування стратегічних рішень. Міжсекторальна співпраця сприяє підвищенню ефективності управління, формує довіру до екологічних ініціатив і забезпечує контроль за їх реалізацією. Активна участь населення у процесі ухвалення екологічних рішень також формує відповідальне ставлення до природи та підвищує результативність реалізованих заходів.

Розроблені стратегії повинні поєднувати довгострокове бачення розвитку міста з практичними кроками, які забезпечують поступове покращення стану довкілля. Це може включати створення “зелених поясів” навколо міста, модернізацію систем водовідведення, перехід на екологічно безпечні види палива, розвиток велоінфраструктури й громадського транспорту [25].

Таким чином, екологічне управління урбоекосистемою — це не одноразовий захід, а постійний процес удосконалення міського середовища, який вимагає злагодженої роботи всіх структур. Реалізація комплексних стратегій дозволить містам не лише знизити рівень екологічних ризиків, але й підвищити комфорт проживання, створюючи умови для гармонійного співіснування людини та природи.

4.2 Перспективні тенденції та практичні рішення у сфері екологічної безпеки міст

Питання екологічної безпеки міських систем сьогодні набуває особливої актуальності у зв'язку з інтенсивною урбанізацією, зростанням антропогенного навантаження та змінами клімату. Забезпечення екологічної стійкості урбанізованих територій потребує пошуку нових підходів, які поєднують технологічні інновації, правові інструменти та активну участь громадськості. Вирішення цих завдань можливе лише за умови системного підходу до планування розвитку міських екосистем, що враховує не лише сучасні виклики, а й довгострокові тенденції сталого розвитку [26].

На основі аналізу сучасного стану екологічної безпеки в українських містах, а також міжнародного досвіду, можна визначити низку перспективних напрямів і практичних рішень, які сприятимуть покращенню стану довкілля, підвищенню якості життя населення та забезпеченню сталого розвитку урбоекосистем.

1. Удосконалення системи екологічного моніторингу шляхом створення автоматизованих мереж спостереження, впровадження сенсорних технологій, використання геоінформаційних систем і дистанційного зондування Землі, що дозволить підвищити точність даних, оперативність реагування та забезпечити відкритий доступ громадськості до результатів спостережень.

2. Вдосконалення нормативно-правової бази у сфері охорони довкілля через гармонізацію національних стандартів із директивами Європейського Союзу, удосконалення екологічного аудиту підприємств, запровадження

ефективних механізмів контролю за дотриманням природоохоронного законодавства та посилення відповідальності за його порушення.

3. Перехід до екологічно чистих технологій у промисловості, енергетиці та транспорті шляхом використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективного обладнання, систем очищення викидів і впровадження електротранспорту, що сприятиме зменшенню рівня забруднення атмосфери й скороченню парникових викидів.

4. Розвиток принципів циркулярної економіки через створення інфраструктури роздільного збору відходів, будівництво сортувальних і переробних комплексів, стимулювання повторного використання ресурсів і переробку органічних відходів на біогаз, що дозволить мінімізувати кількість сміття, яке потрапляє на полігони.

5. Модернізація міської інфраструктури водопостачання та водовідведення шляхом реконструкції очисних споруд, удосконалення систем зливової каналізації, встановлення локальних фільтраційних установок і контролю якості води, що забезпечить стабільний екологічний стан водних ресурсів і знизить ризики вторинного забруднення.

6. Формування зеленого каркаса міста через розширення площі зелених насаджень, створення екологічних коридорів, парків, скверів, зелених дахів і вертикального озеленення будівель, що сприяє поліпшенню мікроклімату, зниженню рівня шуму та підвищенню комфортності міського середовища.

7. Інтеграція концепції «розумного міста» в екологічне управління шляхом застосування інтелектуальних систем моніторингу якості повітря, управління енергоспоживанням, освітленням і транспортними потоками, що забезпечить ефективне використання ресурсів і зменшить навантаження на довкілля [34].

8. Розвиток сталої міської мобільності через розширення мережі громадського транспорту, створення велодоріжок, пішохідних зон і екологічних транспортних хабів, що зменшить кількість приватного автотранспорту, а отже — і рівень викидів шкідливих речовин у повітря.

9. Підвищення екологічної свідомості населення шляхом проведення освітніх програм, екологічних форумів, інформаційних кампаній і волонтерських ініціатив, які сприяють формуванню відповідального ставлення громадян до природних ресурсів і підтримують активну участь у заходах зі збереження довкілля.

10. Реалізація міських програм адаптації до змін клімату через розроблення заходів з протидії спекотним хвилям, посухам, надмірним опадам і підтопленням, включаючи створення зелених зон, водоутримувальних територій, природних дренажних систем і термостійких насаджень, що дозволяють стабілізувати кліматичний баланс міста.

11. Розвиток системи управління небезпечними та електронними відходами через створення спеціалізованих пунктів збору, впровадження безпечних технологій утилізації й демонтажу, контроль за логістикою та поводженням із токсичними матеріалами для запобігання вторинному забрудненню.

12. Поглиблення міжсекторальної співпраці та залучення інвестицій у сферу екологічних проєктів через партнерства влади, бізнесу, наукових установ і громадських організацій, що дозволяє реалізовувати великомасштабні програми енергозбереження, переробки відходів та очищення водних ресурсів.

13. Впровадження системи кількісних показників і екологічних індикаторів (КРІ), таких як рівень забруднення повітря, площа зелених зон на одного мешканця, обсяг перероблених відходів, енергоємність комунальних послуг і якість стічних вод, що забезпечує об'єктивну оцінку стану міського середовища та ефективності управлінських рішень.

14. Інституційне посилення екологічного управління на муніципальному рівні через створення спеціалізованих департаментів, аналітичних центрів і кризових екоштабів, які координують дії під час екологічних надзвичайних ситуацій і здійснюють стратегічне планування у сфері охорони довкілля.

15. Інтеграція екологічних критеріїв у просторове планування міських територій шляхом проведення екологічної експертизи генеральних планів,

регламентування забудови, захисту природних територій від надмірного антропогенного навантаження та включення елементів екологічної інфраструктури в міські стратегії розвитку [27].

Таким чином, перспективні напрями екологічної безпеки охоплюють одночасно технологічні, організаційні, правові та освітні складові. Їх реалізація дасть змогу створити екологічно збалансовану урбаністичну систему, у якій економічний розвиток поєднуватиметься із збереженням природного середовища та забезпеченням здоров'я населення. Лише за умов комплексного підходу та активної участі всіх зацікавлених сторін — органів влади, бізнесу, наукових установ і громадськості — можливо досягти високого рівня екологічної безпеки та сталого розвитку міст.

5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1 Економічна доцільність впровадження енергоощадного вуличного освітлення як стратегії екологічного управління містом

Забезпечення сталого функціонування міських урбоecosystem неможливе без підвищення енергоефективності комунальної інфраструктури, зокрема — систем зовнішнього освітлення. Традиційні вуличні світильники, обладнані натрієвими або ртутними лампами високого тиску, мають високе енергоспоживання, короткий термін служби, обмежені фотометричні характеристики та становлять додаткове навантаження на бюджет міста. Заміна їх на сучасні LED-технології дозволяє досягти не лише економічного, а й екологічного ефекту, що безпосередньо відповідає завданням екологічної безпеки [29].

Для оцінки економічної доцільності було проаналізовано умови типової модернізації освітлювальної інфраструктури на прикладі міста, де функціонує 1000 одиниць вуличного освітлення. Як базу розрахунку було взято середні ринкові ціни та тарифи станом на 2024 рік, що дозволяє адаптувати результати до умов українських міст, зокрема Вінниці.

Вихідні техніко-економічні параметри:

- кількість вуличних світильників — 1000 шт;
- потужність одного натрієвого світильника — 250 Вт;
- потужність одного LED-світильника — 90 Вт;
- тривалість роботи — 10 год/доба;
- кількість робочих днів — 365 днів/рік;
- тариф на електроенергію — 4,80 грн/кВт·год;
- вартість одного LED-світильника з монтажем — 7500 грн;
- строк експлуатації — 10 років.

Річне енергоспоживання старої та нової системи.

Поточна система з натрієвими лампами:

$$E_{\text{старе}} = 1000 \cdot 0,250 \cdot 10 \cdot 365 = 912,5 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Після модернізації:

$$E_{\text{старе}} = 1000 \cdot 0,090 \cdot 10 \cdot 365 = 328,5 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Річна економія енергії:

$$\Delta E = 912,5 - 328,5 = 584,0 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год}$$

Розрахунок фінансової економії та витрат.

Річне заощадження коштів на електроенергії:

$$\Delta C = \Delta E \cdot 4,80 = 584,0 \cdot 4,80 = 2\,803\,200 \text{ грн}$$

Вартість реалізації проєкту:

$$V = 1000 \cdot 7500 = 7\,500\,000 \text{ грн}$$

Основні показники економічної ефективності.

Строк окупності інвестицій:

$$T = \frac{7\,500\,000}{2\,803\,200} \approx 2,68 \text{ року}$$

Коефіцієнт ефективності:

$$K = 2\,803\,200 / 7\,500\,000 \approx 0,374, \text{ або } 37,4\% \text{ річної віддачі.}$$

Екологічний ефект від впровадження.

Зменшення енергоспоживання тягне за собою зниження викидів вуглекислого газу. За нормативом 0,457 т CO₂ на 1 МВт·год спожитої енергії:

$$\Delta CO_2 = 584 \cdot 0,457 = 266,79 \text{ тонн/рік}$$

Сумарне скорочення викидів за 10 років

$$\Delta CO_2^{10} = 266,79 \cdot 10 = 2667,9 \text{ тонн}$$

Таким чином, реалізація даного заходу дозволяє не лише суттєво заощадити бюджетні кошти, а й знизити екологічне навантаження на атмосферне повітря, наближаючи міське господарство до стандартів «зеленої економіки».

Модернізація систем вуличного освітлення з використанням LED-технологій є однією з найперспективніших інвестицій в рамках екологічного управління урбоекосистемами. Її переваги полягають у поєднанні:

- суттєвого економічного ефекту (повернення інвестицій менш ніж за 3 роки);
- довготривалої дії (економія понад 28 млн грн протягом 10 років);
- екологічної вигоди (зменшення понад 2600 тонн CO₂);
- покращення безпеки та комфорту в міському середовищі.

Отже, подібні рішення можуть бути масштабовані на рівень інших комунальних об'єктів — шкіл, лікарень, парків та транспортної інфраструктури — і мають бути закладені в стратегічні плани розвитку українських міст [30].

5.2 Економічна ефективність впровадження заходів з модернізації систем очищення стічних вод в урбоекосистемі

Забруднення водних об'єктів у містах України, включаючи Вінницю, становить одну з найсерйозніших екологічних проблем. Системи водовідведення та очищення стічних вод, побудовані у 1970–1980-х роках, часто не відповідають сучасним вимогам. Внаслідок цього у поверхневій водойми потрапляють неочищені або недостатньо очищені стоки, що погіршує якість питної води, екологічний стан річок та завдає економічних збитків як державі, так і громадам.

Одним із дієвих рішень у цьому напрямку є модернізація очисних споруд за рахунок впровадження енергоефективних технологій, таких як мембранна біореакція (MBR), біофільтрація або використання активного мулу з поліпшеним аераційним контролем. Проведемо економічну оцінку ефективності такої модернізації на прикладі міських очисних споруд у Вінниці [31].

Поточні витрати:

За наявними даними, середній обсяг стічних вод, які очищуються у Вінниці, становить близько 65 000 м³/добу.

Стара система (аеротенки з недостатнім контролем подачі кисню) споживає приблизно 0,8 кВт·год на 1 м³ очищеної води.

Річне енергоспоживання:

$$65\,000 \text{ м}^3/\text{день} \cdot 0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3 \cdot 365 \text{ днів} = 18\,980\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

При тарифі на електроенергію для водоканалів $\approx 5,4$ грн/кВт·год, річні витрати:

$$18\,980\,000 \cdot 5,4 = 102\,492\,000 \text{ грн/рік}$$

Після модернізації:

Системи MBR або біофільтрації дозволяють знизити енергоспоживання до 0,5 кВт·год на 1 м³.

Річне споживання енергії:

$$65\,000 \cdot 0,5 \cdot 365 = 11\,862\,500 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Нові витрати на електроенергію:

$$11\,862\,500 \cdot 5,4 = 64\,057\,500 \text{ грн/рік}$$

Річна економія:

$$102\,492\,000 - 64\,057\,500 = 38\,434\,500 \text{ грн/рік}$$

Окупність модернізації:

Орієнтовна вартість повної модернізації однієї станції складає близько 120 млн грн, враховуючи обладнання, монтаж, навчання персоналу та запуск.

Період окупності:

$$120\,000\,000 \div 38\,434\,500 \approx 3,12 \text{ роки}$$

Для наочності основні економічні показники впровадження енергоефективної технології очищення стічних вод у місті Вінниця узагальнено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння економічних параметрів систем очищення стічних вод

Показник	Стара система	Модернізована система
Енергоспоживання, кВт·год/м ³	0,8	0,5
Загальне річне споживання, кВт·год	18 980 000	11 862 500
Річні витрати на електроенергію, грн	102 492 000	64 057 500
Економія електроенергії, кВт·год	—	7 117 500
Річна економія коштів, грн	—	38 434 500
Період окупності інвестицій, років	—	≈3,12

На рисунку 5.1 відображено динаміку кумулятивного приросту економії бюджетних коштів, що виникає внаслідок щорічного зниження витрат на енергоспоживання після впровадження сучасної енергоефективної технології очищення стічних вод. Побудована крива ілюструє, що вже на третьому році експлуатації досягається повне повернення інвестицій, після чого всі подальші фінансові надходження від економії можуть бути використані на розвиток іншої екологічної інфраструктури. Такий підхід підтверджує доцільність інвестування в модернізацію комунальних очисних споруд як із економічної, так і з екологічної точки зору, особливо в умовах зростання тарифів на електроенергію та загострення екологічної ситуації в урбоекосистемах [32].

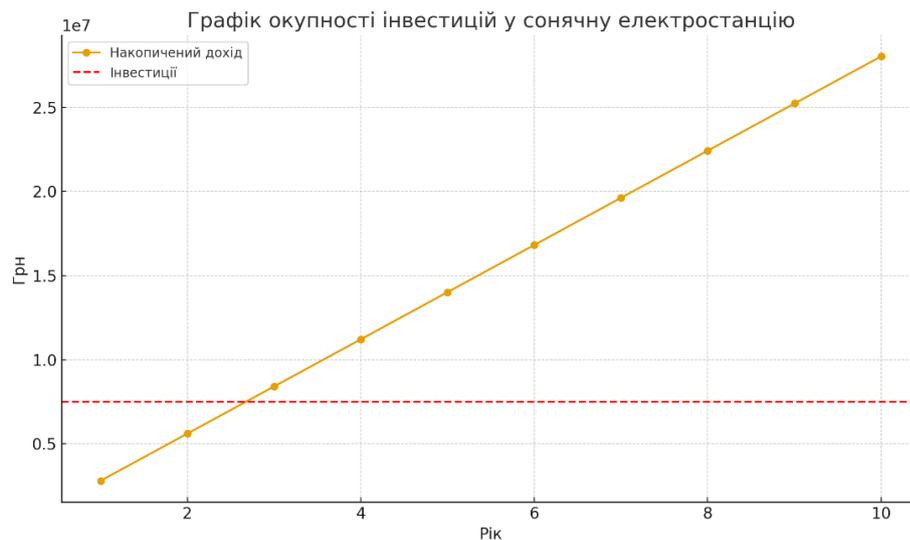


Рисунок 5.1 – Зростання економії коштів після модернізації очисних систем (млн грн)

Додаткові вигоди від модернізації:

Окрім прямої економії на електроенергії, модернізовані системи очищення забезпечують:

- покращення якості скидів у річки відповідно до норм ДСТУ ISO 24512, зниження вмісту азоту, фосфору, БСК5 та завислих речовин;
- зменшення штрафів за екологічні порушення — у середньому до 1,5 млн грн на рік для великих підприємств водовідведення;
- можливість повторного використання очищеної води для технічних потреб (полив, промивання вулиць), що дозволяє економити ресурси питної води до 5–10%.

Соціальні та екологічні вигоди:

1. Покращення здоров'я населення за рахунок зменшення забруднення річкової води, яка є джерелом питного водопостачання для Вінниці та прилеглих громад.

2. Відновлення екосистем річки Південний Буг — зменшення евтрофікації, покращення стану флори та фауни.

3. Зниження вуглецевого сліду, оскільки модернізовані установки виробляють менше CO₂ на 1 м³ очищеної води ($\approx 0,15$ кг проти 0,25 кг CO₂ у старих системах).

Економічна доцільність модернізації очисних споруд у межах урбоекосистеми Вінниці є очевидною. За умов інвестицій у розмірі близько 120 млн грн, місто потенційно отримає економію понад 38 млн грн щороку, а повна окупність проєкту настане менш ніж за 3,2 роки. Разом із фінансовими вигодами впровадження таких заходів сприятиме екологічному оздоровленню міського середовища, підвищенню рівня екобезпеки населення, а також дозволить гармонізувати міську інфраструктуру з європейськими стандартами екологічного управління.

ВИСНОВКИ

У межах виконання магістерської кваліфікаційної роботи було комплексно досліджено проблему забезпечення екологічної безпеки урбоекосистем з урахуванням сучасних викликів, технічних можливостей і соціально-економічних умов міського середовища. На основі опрацювання наукових джерел, нормативних документів та практичних матеріалів, було досягнуто таких результатів:

1. У процесі теоретичного аналізу сутності поняття "екологічна безпека урбоекосистеми" встановлено, що вона включає взаємопов'язані аспекти збереження довкілля, здоров'я населення та стійкості міського розвитку. Виявлено ключові екологічні ризики, зокрема: забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів, деградація ґрунтів, зменшення зелених зон та антропогенне навантаження.

2. Проведено аналітичну оцінку стану урбоекосистеми міста Вінниця. Встановлено основні джерела забруднення – транспорт, комунальні підприємства, промислові викиди, а також визначено динаміку концентрацій шкідливих речовин за роками. Зафіксовано, що концентрації діоксиду азоту та формальдегіду у певні періоди перевищували гранично допустимі норми, що свідчить про необхідність впровадження сучасних систем моніторингу та реагування.

3. Виявлено, що підвищити ефективність екологічного управління можливо через впровадження організаційно-технічних заходів: модернізацію інженерної інфраструктури, підвищення енергоефективності, запровадження сортування відходів, створення зелених зон та екопарків, інформування громадськості. Особливу роль у цьому процесі відіграє залучення громадських ініціатив і підвищення рівня екологічної свідомості населення.

4. Розроблено пропозиції щодо стратегій управління екологічною безпекою урбоекосистем, які базуються на принципах адаптивного та системного підходів, урахування екосистемних послуг, басейнового принципу

управління та міжсекторальної взаємодії. Визначено перспективні напрями, зокрема: впровадження цифрових технологій у моніторинг стану довкілля, розвиток «зеленої» енергетики та посилення правового регулювання у сфері охорони довкілля.

5. У рамках економічної оцінки обґрунтовано доцільність впровадження інноваційних рішень з модернізації систем очищення стічних вод у Вінниці. Згідно з розрахунками, встановлено, що перехід на мембранну біореакцію дозволяє зменшити річне енергоспоживання на понад 7 млн кВт·год, що забезпечує економію близько 38,4 млн грн на рік. Період окупності інвестицій у модернізацію становить приблизно 3,1 року. Крім того, модернізація сприяє зниженню екологічних штрафів, покращенню якості скидів та можливості повторного використання води.

Отже, реалізація окреслених заходів є не лише економічно доцільною, а й критично важливою для формування екологічно безпечного середовища в умовах урбанізованого простору. Практичне впровадження результатів дослідження може бути використано органами місцевого самоврядування, екологічними службами, підприємствами ЖКГ та іншими зацікавленими сторонами для підвищення екологічної стабільності урбоекосистем та покращення якості життя населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародна науково-технічна конференція Енергоефективність в галузях економіки України. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 470 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2025/schedConf/presentations>
2. Барабаш О. В. Оцінка рівня екологічної безпеки урбокосистем за станом атмосферного повітря. *Екологічна безпека та природокористування*. – Київ, 2019. – Вип. 31(3). – С. 57–63.
3. Бобух І. М., Щегель С. М. Стратегічні орієнтири економічного зростання України: інклюзивність як ключовий пріоритет. *Вісник Національної академії наук України*. – 2018. – № 7. – С. 55–70.
4. Войтків П. С. Конструктивно-географічні дослідження урбосистем : навчальний посібник. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2019. – 118 с.
5. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.
6. Гончаренко І. В. Фітоіндикація антропогенного навантаження: монографія. – Дніпро: Середняк Т. К., 2017. – 127 с.
7. Гнатів П. С., Бальковський В. В., Лопотич Н. Я., Дацко Т. М. Техно-й урбосистеми: методологічні підходи до оцінювання стану урбанізованого довкілля. URL: <https://doi.org/10.15421/40290516>
8. Денисик Г. І., Мудрак О. В. Вінничина: загальні і регіональні екологічні проблеми: Навч. посібник. – Вінниця: ВДПУ, 2005. – 134 с.
9. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. Постанова КМУ № 827 від 14.08.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>.
10. Донченко М. В. Геоінформаційні системи : навчальний посібник / М. В. Донченко, І. І. Коваленко. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. – 132 с.

11. Доповідь про стан навколишнього природного середовища у Вінницькій області (2018 рік). *Вінницька обласна рада*. URL: <http://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/departament>.

12. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. – Київ, 2016. – 37 с.

13. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції – Львів : ЛДУБЖД, 2021. – 156 с.

14. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Стратегії збалансованого регіонального розвитку Вінницької області на період до 2027 року. URL: <https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/ODA/strategy/zvitSEO.pdf>

15. Екологічно сталий розвиток урбосистем : матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., Харків, 2–3 листопада 2022 р. / *Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова та ін.* – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 111 с.

16. Екологія міських систем : навч. посіб. Частина 1. / О. М. Климчик, А. П. Багмет, Є. М. Данкевич, С. І. Матковська, за ред. О. М. Климчик. – Житомир: Видавець О.О. Євенок, 2016. – 460 с.

17. Забезпечення екологічної безпеки. Курсове проектування. Методичні вказівки / Уклад. : В. Г. Петрук, Р. В. Петрук, І. І. Безвозюк, П. М. Турчик. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 57 с.

18. Запорожець О., Мовчан Я., Гавриленко В., Гаврилюк Р., Гай А., Гулевець Д. Елементи сучасної урбоекології : навчальний електронний посібник. – Київ: НАУ, 2015. – 265 с.

19. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту «Детальний план території, обмеженої вулицею Квітуча та річкою Південний Буг». – Вінниця, 2023. – 162 с. URL:

<https://vmr.gov.ua/media/2023/%D0%93%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B4%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96%20%D1%81%D0%BB%D1%83%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F/%D0%A1%D0%95%D0%9>

[E%20%D0%9A%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%83%D1%87%D0%B0/%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%A1%D0%95%D0%9E%20%D0%94%D0%9F%D0%A2%20%D0%B2%D1%83%D0%BB.%20%D0%9A%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%83%D1%87%D0%B0.pdf](#)

20. Інтегральні та комплексні оцінки стану навколишнього природного середовища: монографія / О. Г. Васенко, О. В. Рибалова, С. Р. Артем'єв Н. С. Горбань та ін. – Харків: НУГЗУ, 2015. – 419 с.

21. Інтерактивна карта ґрунтів України. URL: <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy>

22. Карта моніторингу якості повітря України. URL: <https://www.saveecobot.com/maps>

23. Козій І. С, Рой І. О., Яхненко О. М., Пономаренко Р. В., Щербак С. С. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. – 2021. – Вип. 10(2). – С. 23-27.

24. Кучерявий В. П., Фітак М. М. Проблеми класифікації та конструювання паркових узлісь. *Науковий вісник НУБіП України: Серія «Лісівництво та декоративне садівництво»*. – 2012. – Вип. 171, ч. 3. – С. 332–339.

25. Климчик О. М., Багмет А. П., Данкевич Є. М., Матковська С. І. Екологія міських систем. Частина 1. Природно-техногенні комплекси: навчальний посібник. – Житомир: Житомирський національний агроєкологічний університет; Видавець О. О. Євенок, 2016. – 460 с.

26. Монарх В. В. Поняття і підходи до оцінки екологічних ризиків. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. – 2017. – № 7 (29). – С. 50-54.

27. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2018 році. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Natsionalna-dopovid-pro-stand-navkolyshnogo-prirodnogo-seredovyshha-v-Ukrayini-u-2018-rotsi_.pdf

28. Орловська Ю. В. Зелене будівництво – шлях до стійкого розвитку урбоекосистем на основі досвіду ЄС / Ю. В. Орловська, Т. Ф. Яковишина // *Економічний простір*. – 2017. – № 120. – С. 216–223.

29. Павленко Л. А. Геоінформаційні системи : навчальний посібник. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 260 с.

30. Самойленко В. М., Пласкальний В. В. Концепції ідентифікації міри антропоізації ландшафтів: ретроспектива та перспективи. *Фізична географія та геоморфологія*. – 2015. – Вип. 4(80), ч. II. – С. 19–38.

31. Скакальський О. Екологічний моніторинг у системі природоохоронної діяльності регіональної влади. *Державне управління та місцеве самоврядування*. – 2015. – Вип. 4. – С. 152–162.

32. Типові правила благоустрою території населеного пункту. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1529-17>.

33. Топографічна карта України. URL: <https://uk-ua.topographic-map.com/map-ls7gb3/%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B0/>

34. Часковський О., Андрейчук Ю., Ямелинець Т. Застосування ГІС у природоохоронній справі на прикладі відкритої програми QGIS: навч. посіб. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка; Вид-во Простір-М, 2021. – 228 с.

35. Чернова Г. В., Денисик Б. Г. Територіально-рекреаційний комплекс Вінницької області. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія «Географія»*. – 2015. – Випуск 27. – С.168–175.

Додаток А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Розробка заходів підвищення екологічної безпеки урбоєкосистеми міста Вінниця

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ екології, хімії та технологій захисту довкілля

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,46 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.

(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Петрук Р. В.

Здобувач

Назаренко І. П.

Додаток Б**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
УРБООКОСИСТЕМИ МІСТА ВІННИЦЯ**



Рисунок Б.1 – Рослинність низинних боліт Південного Бугу



Рисунок Б.2 – Карта ґрунтів Вінницької області

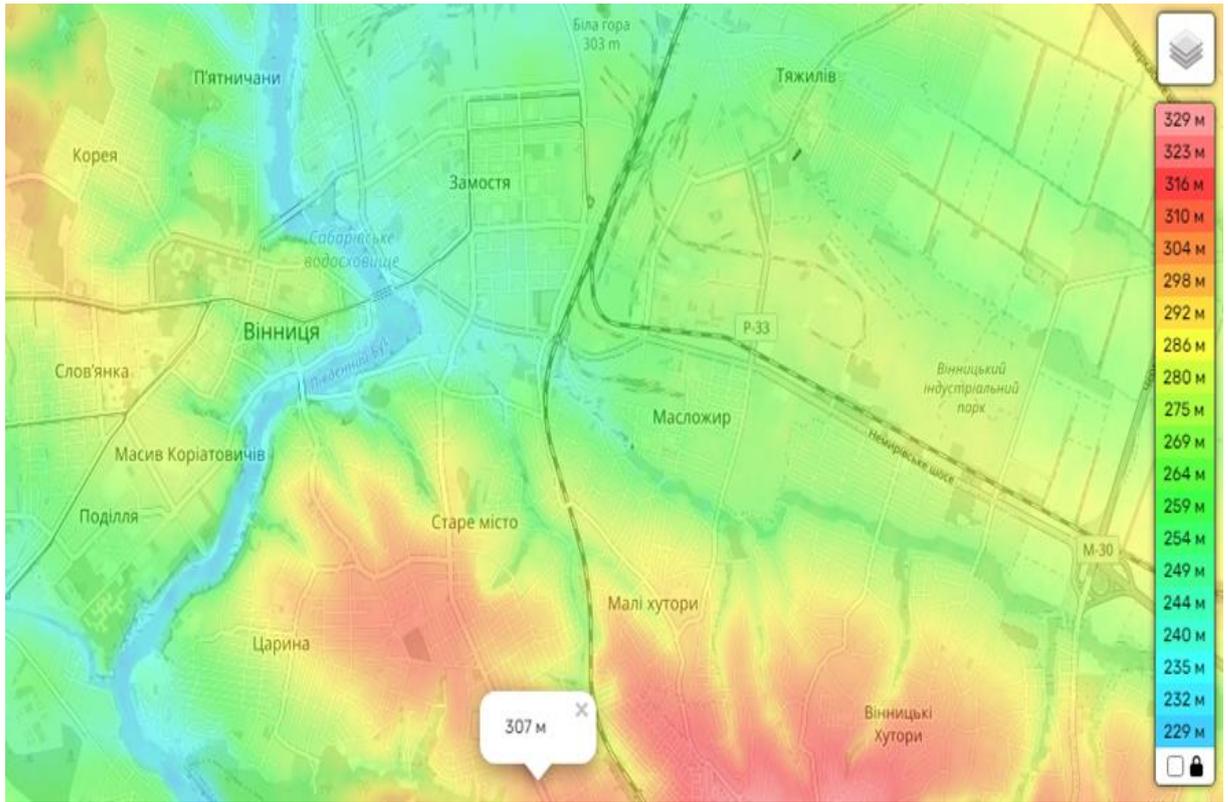


Рисунок Б.3 – Топографічна карта м. Вінниця

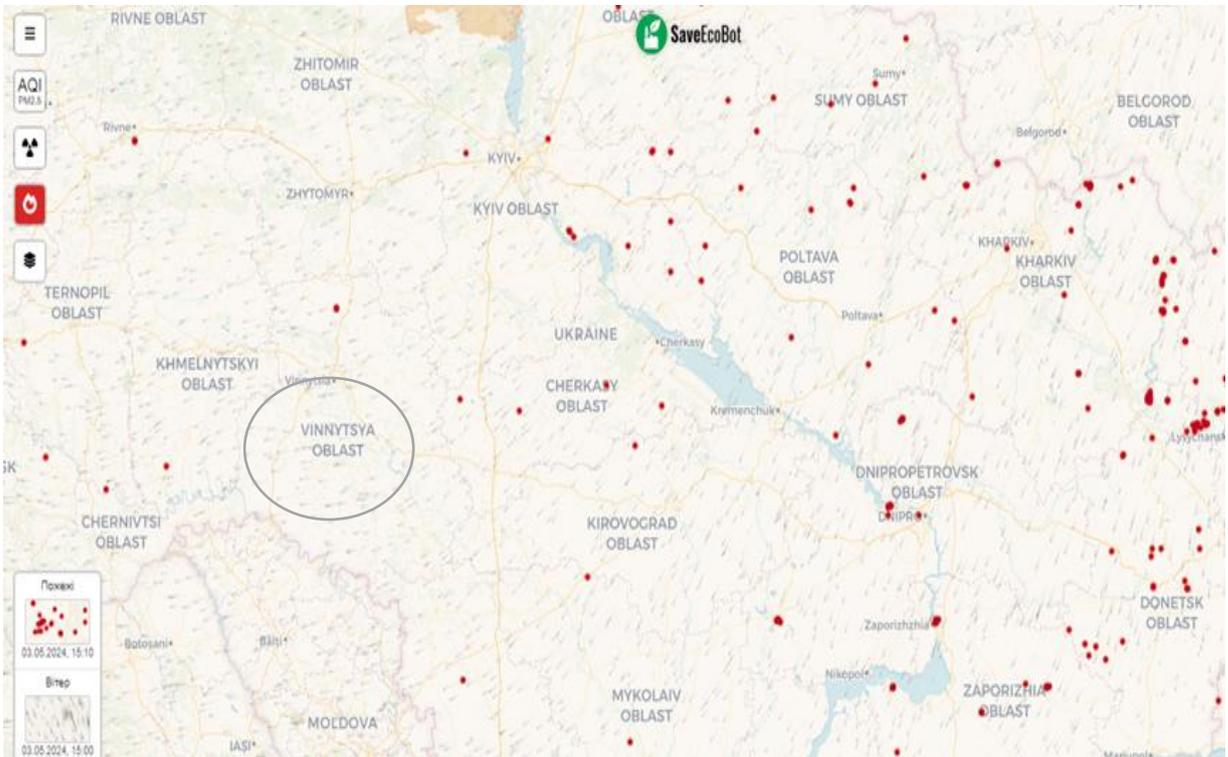


Рисунок Б.4 – Карта пожеж та напрямку вітру України

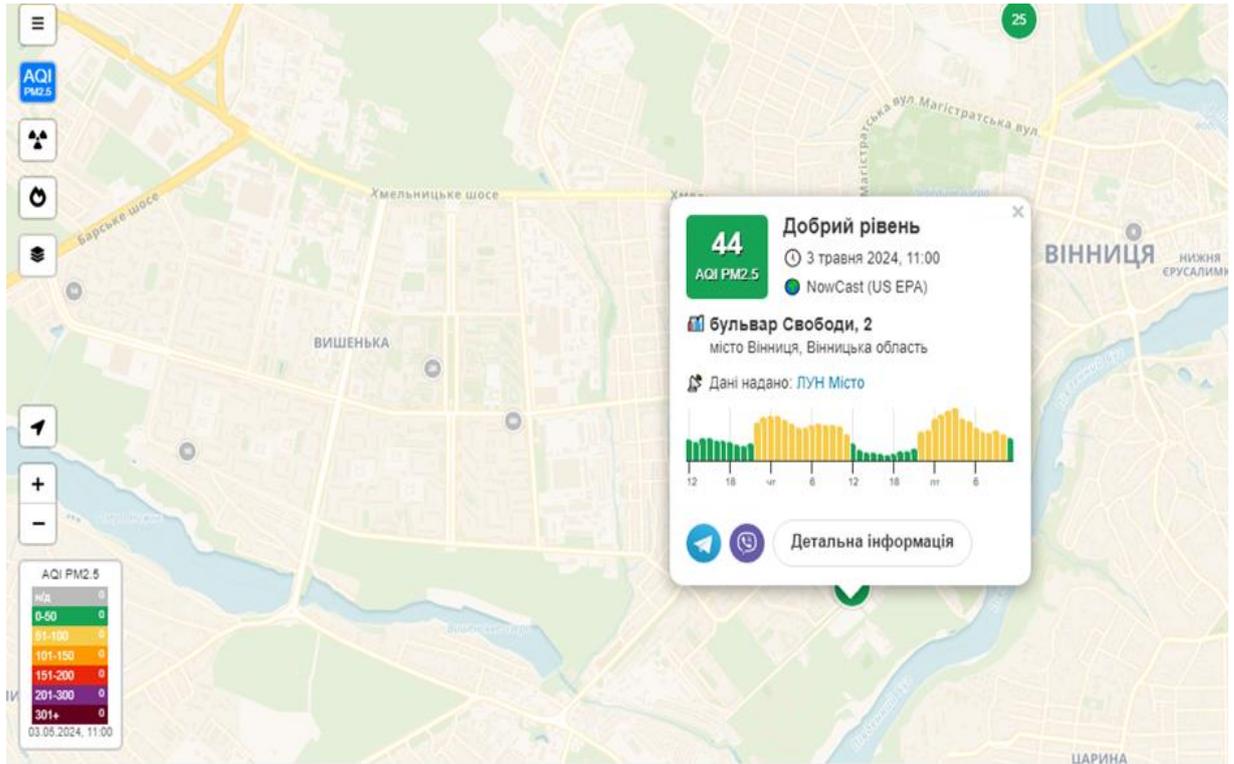


Рисунок Б.5 – Карта забруднення атмосферного повітря м. Вінниця

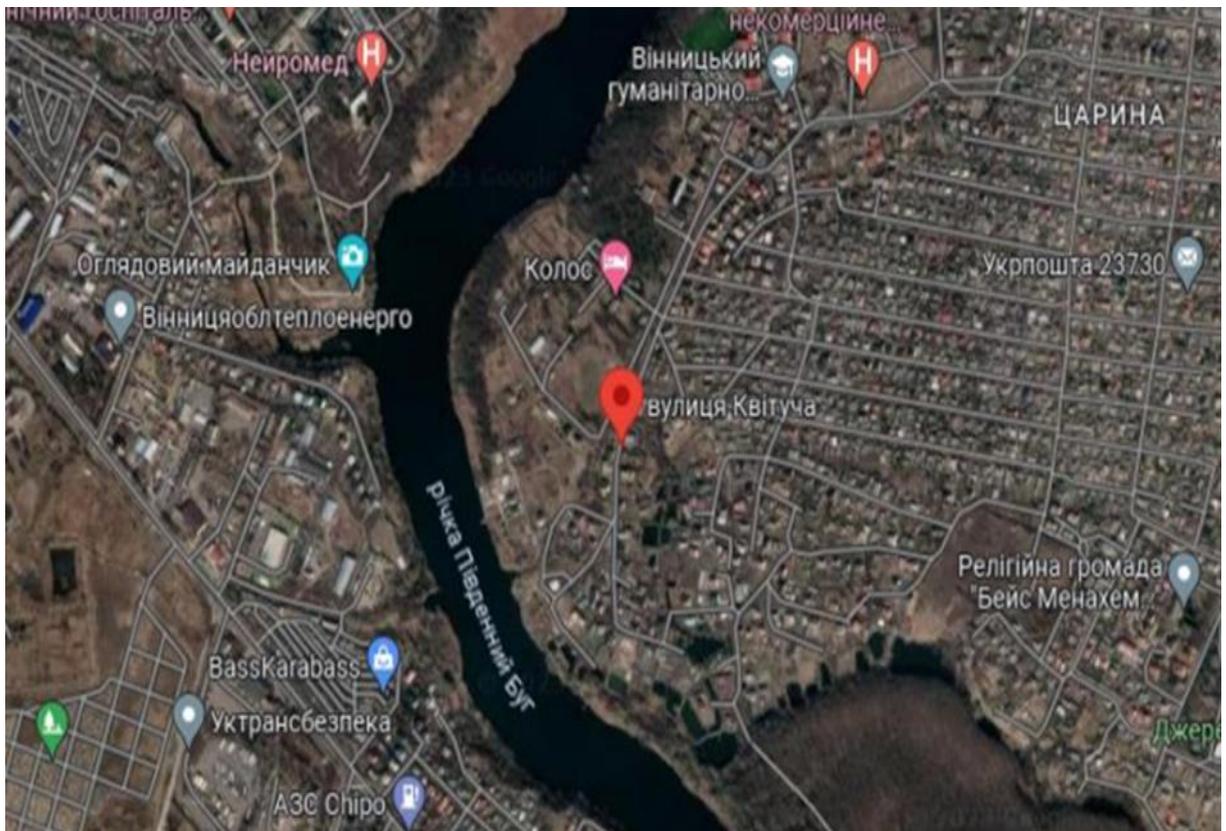


Рисунок Б.6 – Територія району Царина м. Вінниці