

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження та розробка рекомендаційної системи на основі штучного інтелекту для вибору стійких рослин для озеленення міста

Виконав: студент VI курсу, групи СНмз-61
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Головка А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Матійчук Л.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Дуда О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Луцик Н.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)
Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 22 » грудня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Головка Анастасія Владленівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка рекомендаційної системи на основі штучного інтелекту для вибору стійких рослин для озеленення міста

Керівник роботи Матійчук Любомир Павлович к.е.н., доцент, професор кафедри КН
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 29 » листопада 2025 року № 4/7-1139

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації, присвячені методам забезпечення якості та до походженню даних, а також європейські стратегії управління даними, політики доступу даних і підходи до їх валідації.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Аналіз предметної області та існуючих рішень у сфері стійкого озеленення міст в умовах війни. 2 Аналіз підходів, методів та теоретичний основ дослідження рекомендаційної системи. 3 Реалізація дослідження програмного продукту «AI-система вибору стійких рослин для міського озеленення. 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1 Титульна сторінка 2 Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження та Актуальність дослідження. 5 Загальна архітектура розробленої системи. 6 Візуалізація Архітектури. 7 Модуль AI-пояснення результатів рекомендацій. 8 Експериментальне дослідження (сценарії та результати). 9 Демонстрація розробленої системи. 10 Висновки. 11 Завершальний слайд.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О. Я., доцент	25.11.25	08.12.25
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва	25.11.25	08.12.25

7. Дата видачі завдання 29 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	17.11.2025	
2.	Аналіз науково-технічних публікацій та збір даних по темі кваліфікаційної роботи	17.11.2025-24.11.2025	
3.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	25.11.2025-08.12.2025	
4.	Оформлення розділу «Аналіз предметної області та існуючих рішень у сфері стійкого озеленення міст в умовах війни»	09.12.2025-11.12.2025	
5.	Оформлення розділу «Підходи, методи та теоретичні основи дослідження рекомендаційної системи»	09.12.2025-11.12.2025	
6.	Оформлення розділу «Обчислювальний експеримент та реалізація програмного продукту «АІ-система вибору стійких рослин для міського озеленення»	09.12.2025-11.12.2025	
7.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	25.12.2025-08.12.2025	
8.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	25.12.2025-08.12.2025	
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	12.12.2025	
10.	Нормоконтроль	15.12.2025-16.12.2025	
11.	Перевірка на плагіат	17.12.2025	
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	18.12.2025	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2025	

Студент

(підпис)

Головко А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Матійчук Л.П.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дослідження та розробка рекомендаційної системи на основі штучного інтелекту для вибору стійких рослин для озеленення // Кваліфікаційна робота освітнього ступеня «Магістр» // Головка Анастасія Владленівна// Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СНмз-61 // Тернопіль, 2025 // С. 85, рис. – 6, табл. – 7, додат. – 3, бібліогр. – 55.

Ключові слова: рекомендаційна система, міське озеленення, багатокритеріальний аналіз, штучний інтелект, стійкі рослини, післявоєнне відновлення, екологічне планування, база знань.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці AI-підтримуваної рекомендаційної системи добору стійких рослин для міського озеленення в умовах воєнного та післявоєнного відновлення.

У першому розділі кваліфікаційної роботи описано сучасний стан проблеми сталого озеленення, висвітлено екологічні, кліматичні та соціальні фактори, що впливають на вибір рослин у післявоєнному міському середовищі. Розглянуто міжнародні цифрові рішення у сфері урбан-екології та проаналізовано алгоритмічні підходи, що застосовуються у рекомендаційних системах. Подано узагальнення нормативно-методичних засад і визначено вимоги до побудови AI-моделі для українських умов.

У другому розділі кваліфікаційної роботи сформовано теоретичну модель системи рекомендацій: досліджено застосування багатокритеріального аналізу (MCDA) до задачі вибору рослин, подано структуру критеріїв та формалізовано їх у вигляді обмежувальних та оціночних параметрів. Розроблено математичну схему оцінювання, логіку формування пояснень (XAI-модуль) та структуру бази знань для екологічно релевантних параокметрів.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи описано програмну реалізацію розробленої моделі. Проаналізовано архітектуру клієнтської та серверної частин,

структуру API та інтеграційні механізми. Проведено експериментальну перевірку працездатності прототипу, оцінено стабільність алгоритмів, коректність рекомендацій і відповідність програмної реалізації теоретичній моделі. Подано узагальнення результатів та обґрунтовано доцільність використання системи в умовах реконструкції міських територій.

Об'єкт дослідження: процеси вибору та оцінювання рослин для міського озеленення в умовах воєнних і післявоєнних екологічних обмежень.

Предмет дослідження: методи багатокритеріального аналізу, алгоритми рекомендаційних систем і способи їх застосування для формування AI-підтримуваних рішень щодо добору стійких рослин.

ANNOTATION

Research and Development of an Artificial Intelligence-Based Recommendation System for Selection of Sustainable Plants for Urban Landscaping // The educational level "Master" qualification work // Holovko Anastasiya Vladlenivna // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Computer Information Systems and Software Engineering, Department of Computer Science, SNmz-61 group // Ternopil, 2025 // P. 85, tables – 7, posters – 6, annexes – 3, ref. – 55.

Key words: recommendation system, urban greening, multi-criteria analysis, artificial intelligence, resilient plants, post-war recovery, environmental planning, knowledge base.

The thesis is devoted to the development of an AI-supported recommendation system for selecting resilient plant species for urban greening under wartime and post-war recovery conditions.

In the first chapter of the thesis, the current state of the problem of sustainable urban greening is described. Ecological, climatic, and social factors influencing plant selection in post-war urban environments are highlighted. International digital solutions in urban ecology are reviewed, and algorithmic approaches used in recommendation systems are analysed. Normative and methodological foundations are summarised, and the requirements for designing an AI-based model for Ukrainian cities are defined.

In the second chapter of the thesis, the theoretical model of the recommendation system is developed. The application of multi-criteria decision analysis (MCDA) to plant selection tasks is examined, and the system of criteria is structured into limiting (ecological viability) and evaluative (functional resilience and ecosystem services) parameters. A mathematical evaluation framework is proposed, including a rule-based explainability module and a structured knowledge base of ecologically relevant plant traits.

In the third chapter of the thesis, the software implementation of the proposed model is presented. The architecture of the client- and server-side components is analysed, together with the structure of the API and integration workflow. Experimental testing of the prototype is carried out, confirming algorithmic stability, correctness of recommendations, and full consistency between the software implementation and the theoretical model. The practical applicability of the system for post-war urban reconstruction is substantiated.

Object of study: processes of selection and evaluation of plant species for urban greening under wartime and post-war environmental constraints.

Subject of study: methods of multi-criteria analysis, recommendation algorithms, and their application for developing AI-supported decision-making tools for selecting resilient plant species.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

MCDA (англ. Multi-Criteria Decision Analysis) – багатокритеріальний аналіз, метод інтегрованого оцінювання альтернатив за кількома критеріями.

API (англ. Application Programming Interface) – інтерфейс прикладного програмування, механізм взаємодії між клієнтом і сервером.

REST (англ. Representational State Transfer) – архітектурний стиль побудови веб-сервісів на основі стандартних HTTP-операцій.

JSON (англ. JavaScript Object Notation) – текстовий формат структурованого обміну даними між системами.

SQL (англ. Structured Query Language) – мова запитів до реляційних баз даних.

UI (англ. User Interface) – інтерфейс користувача, сукупність елементів взаємодії людини з програмою.

FastAPI (англ. Fast Application Programming Interface) – високопродуктивний Python-фреймворк для створення REST API.

SQLite (англ. Structured Query Language Lite) – легка реляційна вбудована база даних.

React (англ. React JavaScript Library) – бібліотека для створення компонентних інтерфейсів користувача.

Pydantic (англ. Python Data Validation Library) – бібліотека Python для типізації та валідації структур даних.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ СТІЙКОГО ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТ В УМОВАХ ВІЙНИ.....	14
1.1 Стійке озеленення міського середовища: концепції, принципи та роль у відновленні територій	14
1.2 Аналіз факторів, що впливають на вибір рослин для міського середовища в умовах війни	15
1.2.1 Комплекс чинників добору рослин у воєнному та післявоєнному міському середовищі	16
1.3 Сучасні цифрові рішення та рекомендаційні системи у сфері планування міського озеленення: алгоритми, моделі та приклади застосування	18
1.3.1 Інформаційні системи моніторингу та управління озелененням....	18
1.3.2 Рекомендаційні системи та моделі вибору рослин	19
1.3.3 Використання штучного інтелекту та машинного навчання	20
1.3.4 Приклади міжнародних еко-платформ та перспективи впровадження в Україні	20
1.4 Висновки до першого розділу	22
2 ПІДХОДИ, МЕТОДИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	23
2.1 Загальна характеристика та постановка задачі рекомендаційної системи	23
2.1.1 Короткий опис системи.....	23
2.1.2 Формалізація процесу добору рослин	24
2.1.3 Сценарії використання системи	25
2.1.4 Ризики та обмеження використання системи	26
2.2 Підходи та методи, покладені в основу рекомендаційної системи ...	28
2.2.1 Багатокритеріальний підхід як методологічна основна система	28

2.2.2	Обґрунтування вибору детермінованих методів замість моделей машинного навчання	29
2.2.3	Методи структурування, фільтрації та багатокритеріальної обробки даних	30
2.2.4	Пояснюваність рекомендацій як обов'язковий компонент системи підтримки рішень	31
2.3	Теоретична модель роботи рекомендаційної системи та методологія MCDA	31
2.3.1	Багатокритеріальна природа задачі на вибір методів MDCA	32
2.3.2	Структура критеріїв та їх роль у моделі.....	33
2.3.3	Методи нормалізації, агрегування критеріїв та формування пояснень	34
2.3.4	Інтегральна схема функціонування моделі та місце системи в структурі методів штучного інтелекту.....	35
2.4	Експериментальне дослідження роботи рекомендаційної системи...	36
2.4.1	Мета та методика експериментального дослідження	36
2.4.2	Тестові сценарії та вихідні дані.....	37
2.4.3	Мета та методика експериментального дослідження	38
2.4.4	Можливості застосування системи та отриманих даних.....	45
2.5	Висновки до другого розділу.....	46
3	ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ «АІ-СИСТЕМА ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ МІСЬКОГО ОЗЕЛЕНЕННЯ».....	48
3.1	Архітектура та основні компоненти розробки рекомендаційної системи.....	48
3.1.1	Серверна частина (бекенд)	49
3.1.2	Шар даних та база знань	52
3.1.3	Клієнтська частина (фронтенд)	54
3.1.4	Потік даних та взаємодія компонентів	56
3.2	Реалізація бази даних і структури знань.....	57
3.3	Реалізація алгоритмічного модуля	59

3.4 Реалізація API та інтерфейсу користувача	62
3.5 Експериментальна перевірка функціонування програми	65
3.6 Аналіз результатів експерименту та обґрунтування доцільності впровадження	67
3.7 Висновок до третього розділу	69
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	70
4.1 Охорона праці при роботі з інформаційною рекомендаційною системою	70
4.1.1 Умови праці та фактори впливу при роботі з інформаційною рекомендаційною системою	70
4.1.2 Вимоги до умов праці користувача інформаційної системи	72
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Державна система спостереження, збирання, оброблення та аналізу інформації про стан довкілля.....	73
4.3 Висновки до четвертого розділу	77
ВИСНОВКИ	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	81
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Стійке міське озеленення у післявоєнних умовах України набуває стратегічного значення для відновлення еко-системних функцій, пом'якшення кліматичних ризиків, зниження рівня забруднення та підтримки психоемоційного стану населення. Воєнні дії призвели до деградації ґрунтів, руйнування інфраструктури, фрагментації зелених зон і посилення хімічного та теплового навантаження на міські території. В таких умовах традиційні підходи до вибору рослин, що спираються на локальні довідники або досвід окремих фахівців, виявляються недостатніми: задача добору видів перетворюється на складну багатокритеріальну проблему, де необхідно одночасно враховувати екологічні, кліматичні, ґрунтові, соціальні й операційні фактори.

Паралельно відбувається активний розвиток цифрових екосистем, геоінформаційних платформ та інструментів штучного інтелекту, які у світі вже застосовуються для інвентаризації зелених насаджень, прогнозування їхнього стану та підтримки прийняття рішень. Для України ці підходи лише формуються й поки здебільшого не охоплюють специфіку воєнних та післявоєнних ризиків. Це створює потребу у розробленні AI-підтримуваної рекомендаційної системи, яка на основі формалізованих критеріїв та прозорих алгоритмів забезпечуватиме науково обґрунтований вибір стійких рослин для міського озеленення в умовах відбудови. Саме тому дослідження методів і програмної реалізації такої системи є актуальним та важливим напрямом сучасних наукових і прикладних розробок.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є розроблення та дослідження AI-підтримуваної рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення в умовах воєнної та післявоєнної трансформації середовища, яка забезпечує багатокритеріальний, прозорий та інтерпретований добір видів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- проаналізувати сучасний стан проблеми сталого міського озеленення у воєнних та післявоєнних умовах, включно з екологічними, кліматичними, хімічними та соціальними чинниками;
- дослідити наявні підходи, цифрові платформи та рекомендаційні системи у сфері планування міського озеленення, а також методи MCDA та Explainable AI, релевантні до задачі добору рослин;
- сформулювати постановку задачі рекомендаційної системи вибору рослин як задачі багатокритеріального прийняття рішень та визначити набір обмежувальних і оціночних критеріїв;
- розробити теоретичну модель роботи системи на основі методології MCDA з використанням фільтрів екологічної життєздатності та rule-based пояснюваності;
- спроектувати архітектуру програмної системи (серверної та клієнтської частин), визначити структуру бази знань про рослини та формат взаємодії через API;
- реалізувати програмний прототип рекомендаційної системи з використанням сучасних веб-технологій та інструментів оброблення даних;
- провести експериментальне дослідження роботи прототипу на репрезентативних сценаріях, що моделюють типові умови українських міських територій у післявоєнний період, та проаналізувати отримані результати;
- оцінити можливості практичного застосування розробленої системи у процесах відновлення та планування міського озеленення.

Об’єкт дослідження є процеси підтримки прийняття рішень щодо добору рослин для міського озеленення в умовах воєнних та післявоєнних екологічних обмежень.

Предмет дослідження є методи багатокритеріального оцінювання та інтерпретованого AI-підтримуваного рекомендаційного добору стійких видів рослин, а також архітектурні та алгоритмічні рішення програмної системи, що реалізує ці методи.

Наукова новизна одержаних результатів кваліфікаційної роботи полягає в подальшому розвитку методів багатокритеріального аналізу для задачі добору

стійких рослин у післявоєнному міському середовищі та у формуванні прозорої AI-моделі рекомендацій з пояснювальною складовою.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та реалізовано програмна система рекомендаційної системи вибору рослин, що включає базу знань, серверну MCDA-модель та клієнтський веб-застосунок для формування й відображення рекомендацій.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати проведених досліджень обговорювались на XIII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025 р.) та на XIV міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025 р.)

Публікації. Основні результати кваліфікаційної роботи опубліковано у двох працях конференції (Див. додатки А та Б).

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 55 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 85 сторінки, з них 56 сторінки основного тексту, який містить 6 рисунків та 7 таблиць.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ СТІЙКОГО ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТ В УМОВАХ ВІЙНИ

1.1 Стійке озеленення міського середовища: концепції, принципи та роль у відновленні територій

Стійке озеленення є ключовим елементом міської екосистеми та важливою складовою реалізації Цілі сталого розвитку № 11 Програми ООН [1]. Під міською зеленою інфраструктурою розуміють мережу зелених насаджень – парків, скверів, бульварів, дахових садів і зелених коридорів, що забезпечують збалансовану взаємодію між природними та антропогенними компонентами міського простору.

Міська зелена інфраструктура надає широкий спектр еко-системних послуг [2]: регулює мікроклімат і знижує теплове навантаження, пом'якшуючи ефект міського теплового острова; покращує якість повітря шляхом поглинання вуглекислого газу та фільтрації твердих часток; зменшує шумове навантаження; стабілізує водний баланс через перехоплення опадів та уповільнення стоку; підтримує біорізноманіття і формує рекреаційні простори. Наявність зелених зон позитивно впливає на фізичне та психоемоційне благополуччя населення, сприяє соціальній взаємодії та створює середовище психологічного відновлення [3].

У контексті кліматичної адаптації деревна рослинність відіграє важливу роль у локальному охолодженні та зменшенні енергоспоживання в теплі періоди. Сучасна практика міського планування ґрунтується на принципі добору рослин відповідно до умов місця зростання, що передбачає врахування клімату, ґрунтів, рівня забруднення та функціонального призначення території [4]. У післявоєнному місті озеленення виконує подвійну функцію – екологічну та соціально-символічну: воно сприяє відновленню природних процесів на пошкоджених територіях, стабілізує ґрунти, знижує запиленість і температуру поверхні, а також підтримує відновлення соціальних зв'язків, локальної ідентичності та відчуття спільної участі громади [5]. Таким чином, стійке озеленення після війни є не лише елементом інфраструктурної відбудови, а й

механізмом відновлення взаємодії між людиною та природою, що формує методологічне підґрунтя для подальших досліджень.

1.2 Аналіз факторів, що впливають на вибір рослин для міського середовища в умовах війни

Вибір видів для міського озеленення у воєнний та післявоєнний період відрізняється від мирних сценаріїв ширшим спектром ризиків, дефіцитом ресурсів і зміною екологічної бази. Середовище стає багатофакторно стресогенним: одночасно діють забруднення ґрунтів і вод, теплові хвилі та дефіцит зволоження, руйнування мікрорельєфу й інженерної інфраструктури, а також операційні обмеження догляду (полив, обрізка, заміни, безпека робіт). Це зумовлює перехід від переважно естетичних критеріїв добору до інженерно-екологічних, де пріоритетом стають функціональна стійкість, низькі вимоги до догляду та здатність забезпечувати ключові еко-системні послуги у зміненому міському ландшафті.

У практичному вимірі фактори, що впливають на добір видів, можна згрупувати за такими напрямками.

По-перше, екологічні та хімічні фактори, пов'язані з контамінацією ґрунтів і вод токсикантами, наслідками пожеж і наявністю локальних «гарячих точок» забруднення. Це підсилює потребу у видах, толерантних до забруднення, здатних витримувати складні субстрати або забезпечувати стабільний ріст за обмеженого об'єму ґрунту.

По-друге, кліматичні та мікрокліматичні фактори, зокрема посилення теплових хвиль, дефіцит вологи та руйнування систем зрошення, що формує попит на жаро- і посухостійкі види з ефективним затіненням і стійкою фізіологічною реакцією на стрес. По-третє, аерогенне та дорожнє забруднення, яке вимагає від насаджень бар'єрної функції й стійкості до пилу, солей і газових домішок.

Окрему групу становлять морфологічні й технічні обмеження міського середовища: ущільнені ґрунти, малі посадкові лунки, конфлікти з інженерними

комунікаціями та обмежений кореневий простір. У таких умовах пріоритет мають види з керованою кореневою системою, стійкі до обрізки та придатні до застосування інженерних рішень для підтримки росту. Не менш важливими є соціальні та операційні чинники – дефіцит кадрів і бюджету, ризики безпеки, складна логістика поливу й замін – що підсилюють потребу у довговічних, невибагливих і безпечних видах. Сукупно ці групи факторів переводять задачу добору рослин у площину багатовимірної інженерно-екологічної оптимізації, яка потребує формалізації критеріїв і їх подальшої інтеграції в алгоритмічні системи підтримки рішень.

1.2.1 Комплекс чинників добору рослин у воєнному та післявоєнному міському середовищі

Воєнні та післявоєнні умови формують складний набір чинників, що одночасно впливають на життєздатність міських рослин і визначають підходи до їх добору. Кліматичні та мікрокліматичні зміни проявляються у посиленні теплових хвиль, дефіциті зволоження, втраті тіньового пологу та оголенні мінеральних поверхонь, що підсилює ефект міського перегріву [6]. Руйнування або нестабільність систем зрошення додатково обмежують можливості догляду, що зумовлює потребу у жаро- та посухостійких видах зі стабільною транспірацією, достатньою листовою площею та здатністю забезпечувати локальне охолодження міського простору [7].

Паралельно з кліматичними чинниками суттєвого значення набуває аерогенне та дорожнє забруднення. У міському повітрі зростає концентрація пилу, золи, мікрочасток будівельних матеріалів, гумових і металевих домішок, а також продуктів згоряння палива [8]. За таких умов зелені насадження мають виконувати бар'єрну функцію, що вимагає добору видів із морфологічними ознаками, здатними ефективно перехоплювати тверді частки, та фізіологічною стійкістю до солей, озону й оксидів азоту [9].

Морфологія міського середовища та технічні обмеження також істотно впливають на вибір рослин. Ущільнення ґрунтів, малі посадкові лунки, конфлікти з інженерними комунікаціями та обмежений кореневий простір є типовими для територій, що зазнали руйнувань [10]. Це зумовлює пріоритет видів із керованою або компактною кореневою системою, стійкістю до обрізки та здатністю адаптуватися до інженерних рішень, спрямованих на збільшення доступного об'єму ґрунту та стабілізацію водного режиму [11].

Важливу роль відіграють соціальні та операційні чинники. Дефіцит фінансових і кадрових ресурсів, ризики безпеки, складна логістика поливу й замінів обмежують можливості інтенсивного догляду за насадженнями [12]. У таких умовах пріоритет надається довговічним, невибагливим видам з високою приживлюваністю, низьким алергенним і токсичним потенціалом, а також стійкістю до вандалізму й механічних ушкоджень. Для житлових і соціально значущих територій особливо важливими є безпека користувачів та мінімізація ризиків пошкодження інфраструктури [13].

Сукупність зазначених обмежень формує цільовий біо-функціональний профіль стійкої міської рослини. До нього належать жаро- та посухостійкість, толерантність до забруднення й солей, стабільна листова площа для затінення, помірні вимоги до води після приживлення, керована архітектура крони та кореневої системи, а також здатність функціонувати у бідних або деградованих субстратах [14]. За можливості враховується внесок рослин у фіторе mediaцію або, навпаки, низька акумуляція токсикантів у надземній біомасі для зон із контактним використанням [15].

Нормативно-методичні підходи до добору видів у таких умовах базуються на поєднанні загальних принципів відповідності рослини ділянці з урахуванням просторових, екологічних і експлуатаційних обмежень [16]. У післявоєнному контексті ці підходи розширюються вимогами до мульти-функціональності насаджень, адаптації до контамінованих середовищ і знижених можливостей догляду, що потребує формалізації критеріїв добору та їх систематизації.

Узагальнення наведених чинників має безпосередні імплікації для проєктування AI-підтримуваної рекомендаційної системи. Висока варіативність

умов, неповнота та просторово нерівномірна доступність даних, а також вимоги до прозорості й передбачуваності рішень зумовлюють доцільність використання детермінованих і багатокритеріальних моделей на початкових етапах [17]. Такий підхід дозволяє структурувати складне середовище, зменшити невизначеність і забезпечити базову, інтерпретовану оцінку екологічної сумісності рослин, створюючи основу для подальшого розширення системи та інтеграції додаткових даних у майбутньому.

1.3 Сучасні цифрові рішення та рекомендаційні системи у сфері планування міського озеленення: алгоритми, моделі та приклади застосування

Діджиталізація екологічного управління та розвиток технологій штучного інтелекту істотно змінюють підходи до планування й підтримки міського озеленення. Сучасні цифрові системи дозволяють інтегрувати просторові дані, кліматичні показники, результати моніторингу стану рослин і соціально-економічні характеристики територій у межах єдиних аналітичних платформ підтримки прийняття рішень [18]. Для післявоєнного періоду такі рішення є особливо актуальними, оскільки дають змогу поєднати швидкість відновлювальних дій із науково обґрунтованою оцінкою екологічних ризиків та ресурсних обмежень.

У практиці міського планування цифрові рішення поступово переходять від пасивного інвентаризаційного підходу до активних аналітичних систем, здатних не лише відображати стан зелених насаджень, а й формувати рекомендації щодо їх відновлення, заміни або розвитку. Така еволюція зумовлена зростанням обсягів доступних даних, розвитком алгоритмів аналізу та потребою у прозорих і відтворюваних управлінських рішеннях [19].

1.3.1 Інформаційні системи моніторингу та управління озелененням

Найпоширенішим напрямом діджиталізації є створення геоінформаційних систем для обліку, аналізу та управління міськими зеленими зонами. Подібні платформи зазвичай поєднують картографічну візуалізацію, бази даних про рослини та інструменти збору інформації про їхній стан. Вони забезпечують прозорість управління, підвищують обізнаність громадськості та створюють основу для довгострокового моніторингу змін у зеленій інфраструктурі [20].

Водночас більшість наявних систем зосереджені переважно на фіксації та відображенні даних, тоді як аналітичні функції прогнозування або автоматизованого добору видів залишаються обмеженими. Це знижує їхню ефективність у складних умовах післявоєнного відновлення, коли необхідно швидко приймати рішення за неповних або неоднорідних даних. Отже, інтеграція моніторингових платформ із рекомендаційними та аналітичними модулями є логічним наступним кроком розвитку цифрової екологічної інфраструктури [21].

1.3.2 Рекомендаційні системи та моделі вибору рослин

Рекомендаційні системи у сфері міського озеленення ґрунтуються на принципі багатокритеріального вибору, за якого кожен вид рослин оцінюється за сукупністю екологічних, кліматичних і функціональних параметрів. Такі параметри можуть включати толерантність до стресових факторів, вимоги до ґрунту та вологи, швидкість росту, здатність до затінення, стійкість до забруднення та інші ознаки, важливі для конкретного міського контексту [22].

У сучасних підходах застосовуються різні типи моделей, які дозволяють зіставляти характеристики рослин з умовами локації, узагальнювати досвід використання видів у різних середовищах або комбінувати алгоритмічні методи з експертними правилами. Поєднання таких підходів підвищує стабільність рекомендацій і дає змогу адаптувати систему до варіативності міського середовища, що особливо важливо в умовах воєнних і післявоєнних трансформацій [23].

1.3.3 Використання штучного інтелекту та машинного навчання

Застосування методів штучного інтелекту розширює можливості прогнозування в екологічному плануванні та дозволяє працювати з великими обсягами різнорідних даних. У задачах міського озеленення використовуються моделі, здатні оцінювати ймовірність виживання рослин, прогнозувати показники росту або виявляти деградовані ділянки на основі просторових і візуальних даних [24]. Такі підходи підвищують точність оцінювання, однак водночас потребують ретельної валідації та інтерпретації результатів.

У контексті муніципального управління особливе значення має прозорість і передбачуваність рекомендацій. Це зумовлює обмеження використання складних непрозорих моделей на початкових етапах і підсилює доцільність поєднання методів штучного інтелекту з формалізованими правилами та багатокритеріальними алгоритмами, які дозволяють чітко пояснювати логіку отриманих результатів [25].

1.3.4 Приклади міжнародних еко-платформ та перспективи впровадження в Україні

Сучасні міжнародні еко-платформи у сфері міського озеленення демонструють перехід від статичних інвентаризаційних рішень до динамічних аналітичних систем, що поєднують екологічний моніторинг, просторовий аналіз і алгоритми штучного інтелекту [26]. Такі платформи орієнтовані не лише на фіксацію стану зелених насаджень, а й на підтримку стратегічних рішень щодо їх відновлення, розвитку та пріоритизації інвестицій у складних міських умовах.

Використання прогнозних моделей і аналітичних інструментів дозволяє оцінювати екологічні ризики, визначати ділянки з підвищеною вразливістю та формувати рекомендації щодо добору рослин відповідно до локальних умов і функціональних цілей озеленення [27]. Узагальнення таких підходів подано в таблиці 1.1, яка ілюструє різні напрями застосування цифрових технологій у міжнародній практиці міського екологічного планування.

Таблиця 1.1 – Приклад міжнародних еко-платформ

Платформа / Проєкт	Країна	Основна технологія	Функціонал
Plant.id AI	Польща	Нейронні мережі (CNN)	Автоматичне розпізнавання видів за фото, класифікація за екологічними параметрами
Treepedia (MIT + World Economic Forum)	США / глобально	Аналіз супутникових знімків та ML	Розрахунок індексу Green View Index для міст світу
Urban Green Infrastructure Hub	Євросоюз	Інтеграція ГІС, Big Data та моделювання	Підтримка прийняття рішень щодо відновлення та планування зелених зон
Azure AI for Sustainability	США	Хмарні ML-моделі Microsoft Azure	Прогнозування екологічних показників і вуглецевого балансу

Досвід упровадження міжнародних платформ свідчить про доцільність інтеграції просторових, екологічних і соціальних даних у межах єдиних цифрових систем. Для України цей підхід є особливо актуальним у контексті післявоєнного відновлення, коли необхідно поєднувати обмежені ресурси з високим рівнем екологічної невизначеності та різномірністю умов міського середовища [28].

В українських умовах перспективною є розробка рекомендаційної системи, здатної враховувати локальні кліматичні й ґрунтові параметри, рівень забруднення, доступність води та особливості використання територій. Поєднання просторового аналізу стану середовища, формалізованих екологічних критеріїв і багатокритеріальних алгоритмів оцінювання створює основу для прозорого й обґрунтованого вибору стійких рослин для конкретних локацій [29].

Таким чином, адаптація міжнародного досвіду до українського контексту передбачає не пряме копіювання готових рішень, а створення гнучкої AI-підтримуваної системи, орієнтованої на поступове розширення функціональності. На початковому етапі така система має зменшувати

невизначеність і підтримувати експертні рішення, а в перспективі – інтегрувати додаткові екологічні, просторові та соціальні дані для комплексного управління міським озелененням [30].

1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи подано аналітичний огляд сучасного стану проблеми сталого міського озеленення, проаналізовано наукові дослідження та практичні підходи в галузі екологічного планування, а також визначено напрями розвитку цифрових систем підтримки прийняття рішень. На основі аналізу літератури показано, що стійке озеленення є ключовим чинником підвищення кліматичної та соціальної резильєнтності міст, особливо в умовах післявоєнного відновлення, оскільки сприяє відновленню екосистем, покращенню мікроклімату та соціально-психологічному відновленню населення.

Окрему увагу приділено післявоєнному контексту, для якого характерні деградація територій, руйнування інфраструктури та забруднення ґрунтів, що суттєво підвищує екологічні ризики. Показано, що задача добору рослин у таких умовах має характер багатокритеріальної оптимізації та потребує одночасного врахування екологічних, інженерних, операційних і соціальних чинників.

У результаті огляду сучасних цифрових рішень встановлено, що у світі активно розвиваються системи, які поєднують геоінформаційні технології, моніторингові дані та алгоритми аналізу для підтримки міського озеленення, тоді як в Україні подібні інструменти перебувають на етапі становлення. Таким чином, ключовою науковою проблемою є побудова багатокритеріальної, інтерпретованої моделі оцінювання рослин, здатної враховувати екологічні параметри локацій і функціональні властивості видів, що й обґрунтовує доцільність розробки AI-підтримуваної рекомендаційної системи, опис якої подано в наступних розділах роботи.

2 ПІДХОДИ, МЕТОДИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Загальна характеристика та постановка задачі рекомендаційної системи

У цьому підрозділі наведено загальну характеристику розробленої рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення в умовах післявоєнного відновлення. Розглянуто призначення системи, її архітектурну логіку, формалізацію процесу добору та ранжування рослин, типові сценарії практичного застосування, а також основні ризики й обмеження, які впливають на коректність інтерпретації сформованих рекомендацій.

2.1.1 Короткий опис системи

Рекомендаційна система вибору стійких рослин для міського озеленення, розроблена в межах даної роботи, є інтелектуальним інструментом підтримки прийняття рішень, орієнтованим на специфіку воєнних і післявоєнних умов урбанізованих територій. Її основне призначення полягає в автоматизованому доборі видів рослин з урахуванням екологічних параметрів локації, обмежень середовища та вимог до стійкості насаджень. Система формує обґрунтовані рекомендації, що поєднують екологічну валідність, практичну доцільність і пояснюваність результатів.

Архітектурно система включає базу знань рослин, у якій збережено їх екологічні, експлуатаційні та функціональні характеристики, модуль попередньої перевірки життєздатності, що відсіює види, які апіорно не відповідають умовам локації, багатокритеріальний модуль оцінювання, що інтегрує параметри середовища й властивості рослин у єдину узагальнену метрику, а також гібридний модуль пояснення результатів і користувацький інтерфейс для введення даних та отримання рекомендацій. Кожен із цих

компонентів виконує окрему функцію в межах єдиного процесу формування рекомендацій і логічно пов'язаний з іншими складовими системи.

Система функціонує за принципом екологічної відповідності, за якого для кожного виду рослин оцінюється не лише відповідність окремим критеріям, таким як морозостійкість, посухостійкість або світловий режим, а й узгодженість цих параметрів у межах цілісної моделі. Вхідні параметри, що задаються користувачем, порівнюються з характеристиками рослин у базі знань, після чого здійснюється фільтрація, яка унеможливорює рекомендацію видів, неспроможних виживати в заданих умовах.

Особливістю системи є використання детермінованих, прозорих і відтворюваних методів оцінювання. Формування пояснень результатів реалізовано у два етапи: спочатку система генерує базове правило-орієнтоване пояснення на основі критеріїв, що найбільше вплинули на підсумкову оцінку, а за наявності доступу до зовнішнього сервісу додатково створює розширене текстове пояснення. У разі недоступності такого сервісу система автоматично повертається до базових пояснень, що забезпечує стабільність роботи та незалежність логіки прийняття рішень від зовнішніх чинників.

Система спроектована як гнучка та масштабована. База знань може бути розширена новими видами рослин, а алгоритм оцінювання – доповнений новими критеріями або спеціалізованими фільтрами, зокрема пов'язаними з токсичністю, фітосанітарними ризиками чи толерантністю до забруднення. Це робить систему придатною не лише для завдань післявоєнного відновлення міських ландшафтів, а й для довгострокового планування зелених зон в умовах кліматичних і соціальних змін.

2.1.2 Формалізація процесу добору рослин

Формалізація процесу добору є ключовим етапом побудови рекомендаційної системи, оскільки вона визначає об'єкт і предмет дослідження, структуру вхідних та вихідних даних, а також обмеження і критерії, що впливають на формування результатів. У контексті міського озеленення

процедура рекомендації має характер багатокритеріального процесу, який поєднує екологічні, кліматичні, ґрунтові та функціональні параметри середовища.

Об'єктом дослідження є рослинні види, представлені у формалізованій базі знань із визначеними екологічними характеристиками. Предметом дослідження є процес їх ранжування відповідно до умов конкретної урбанізованої локації. Вхідні параметри включають тип ґрунту, мінімальні температурні значення, світловий режим, бажані показники посухостійкості, біорізноманіття, швидкості росту та відновлення, а також додаткові екологічні вимоги залежно від сценарію використання. Вихідними даними є відсортований перелік рекомендованих видів із відповідними інтегральними коефіцієнтами та поясненнями факторів, що визначили результат.

Процес рекомендації реалізується як послідовна трансформація початкової множини доступних рослин у підмножину життєздатних видів шляхом застосування екологічних фільтрів, а далі – як ранжування цієї підмножини за багатокритеріальною функцією відповідності. Така формалізація створює основу для побудови теоретичної моделі оцінювання, що розглядається в наступних підрозділах.

2.1.3 Сценарії використання системи

Рекомендаційна система може застосовуватися в широкому спектрі практичних контекстів міського озеленення, що підвищує її функціональну та соціально-екологічну цінність. Одним із базових сценаріїв є планування озеленення територій, пошкоджених унаслідок бойових дій. У таких локаціях порушуються ґрунтові горизонти, змінюється водний режим і мікроклімат, а можливості догляду є обмеженими. Система дозволяє ідентифікувати види, здатні приживатися в деградованих умовах, і підтримує формування зелених зон навіть за відсутності повноцінної інфраструктури.

Іншим важливим сценарієм є модернізація озеленення громадських просторів у межах повоєнної реконструкції. У цьому випадку система забезпечує

добір рослин з урахуванням експлуатаційних вимог, таких як стійкість до механічних навантажень, швидкість росту та здатність до відновлення. Окрему групу сценаріїв становить планування озеленення освітніх і рекреаційних територій, де пріоритетними є безпечність, нетоксичність і мінімальні вимоги до догляду. Система також може використовуватися для підтримки громадських ініціатив із відновлення зелених зон, забезпечуючи зрозумілий інструмент добору рослин для користувачів без спеціальної підготовки.

На стратегічному рівні система може бути застосована у процесі розробки містобудівної документації та адаптаційних стратегій до змін клімату. Узагальнені показники відповідності дають змогу використовувати результати рекомендацій як модельний інструмент для оцінки придатності видів у різних районах міста.

2.1.4 Ризики та обмеження використання системи

Незважаючи на переваги, рекомендаційна система має низку обмежень, пов'язаних із неповнотою екологічних даних, нерівномірністю післявоєнного стану територій і детермінованим характером моделі. Частина характеристик рослин у доступних джерелах має узагальнений або якісний характер, що може впливати на точність оцінювання в складних локаціях. Крім того, система працює з параметрами, введеними користувачем, тому помилки у визначенні умов середовища можуть знижувати коректність рекомендацій.

Свідомий вибір детермінованої моделі забезпечує пояснюваність і відтворюваність результатів, але обмежує можливість автоматичного врахування складних нелінійних взаємодій, характерних для екосистем. Модель також не здійснює динамічної адаптації до поступових змін середовища, що потребує періодичного оновлення бази знань і параметрів.

Систематизація можливих ризиків і обмежень подана у вигляді реєстру ризиків у таблиці 2.1, який дозволяє оцінити їх імовірність, вплив і пріоритет, а також окреслити шляхи пом'якшення.

Таблиця 2.1 – Приклад міжнародних еко-платформ

Ризик / обмеження	Опис проблеми	Ймовірність виникнення	Ступінь впливу	Пріоритет ризику	Можливі заходи пом'якшення
Неповнота або варіативність екологічних даних	Обмеженість наявних баз знань; наявність якісних, характеристик рослин	Середня	Високий	Високий	Розширення бази видів; уточнення параметрів; використання діапазонів значень
Детермінований характер моделі	Відсутність можливості врахування складних нелінійних взаємозв'язків; обмежена гнучкість моделі	Середня	Середній	Середній	Запровадження гібридних моделей; сценарний аналіз у майбутніх версіях
Відсутність автоматичного оновлення даних про середовище	Необхідність ручного оновлення параметрів = ризик застарілих рекомендацій	Середня	Високий	Високий	Інтеграція з датчиками, супутниковими даними, міськими системами моніторингу
Надмірна залежність від фіксованих ваг критеріїв	Фіксовані ваги можуть не відображати пріоритети для різних сценаріїв озеленення	Середня	Середній	Середній	Запровадження сценарних профілів (мінімальний догляд, тінь, стійкість до забруднення)
Залежність від зовнішнього сервісу для формування розширених пояснень	Для створення текстових пояснень використовується сервіс OpenAI; його недоступність призводить до повернення до базових пояснень.	Середня	Низький	Середній	Кешування пояснень; автоматичне повернення до простих пояснень; контроль кількості запитів.

Аналіз реєстру свідчить, що найбільш критичними є ризики, пов'язані з якістю вхідних даних і варіативністю післявоєнних умов, урахування яких є необхідною передумовою коректного застосування системи та її подальшого розвитку.

2.2 Підходи та методи, покладені в основу рекомендаційної системи

Проектування рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення потребує інтеграції екологічних, інженерних та інформаційних підходів, здатних забезпечити науково обґрунтоване прийняття рішень у складних умовах післявоєнної трансформації територій [31]. На відміну від класичних задач інформаційних систем, у яких домінують технічні параметри та формальні вимоги до оброблення даних, задача добору рослин має багатовимірний, екологічно чутливий характер і залежить від поєднання природних та антропогенних чинників. Саме тому методологічну основу системи сформовано з урахуванням вимог прозорості, відтворюваності та можливості аудиту рішень, що є критично важливими для міського планування та управління зеленими насадженнями [32].

2.2.1 Багатокритеріальний підхід як методологічна основна система

Ключовою науковою засадою побудови рекомендаційної системи є багатокритеріальний підхід «Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)» [33], який широко застосовується у сфері екологічного менеджменту, планування природних ресурсів, розвитку міських екосистем та оцінювання екологічних ризиків [34]. Використання MCDA є теоретично обґрунтованим, оскільки добір рослин у міських умовах належить до класу задач багатовимірної оптимізації, де жоден критерій не може розглядатися ізольовано від інших.

У процесі озеленення необхідно одночасно враховувати морозостійкість, посухостійкість, світлові вимоги, тип ґрунту, здатність до підтримки біорізноманіття, швидкість росту та відновлення. Ці параметри перебувають у потенційному конфлікті між собою: наприклад, види з високою посухостійкістю часто характеризуються повільнішими темпами росту, тоді як рослини, що забезпечують інтенсивне затінення, можуть вимагати підвищеної вологості ґрунту. Багатокритеріальний підхід дозволяє інтегрувати такі параметри в єдину

формалізовану модель, зберігаючи логіку оцінювання та забезпечуючи збалансованість кінцевого рішення.

У післявоєнному контексті MCDA має додаткову перевагу, оскільки дозволяє працювати з неповними, нерівномірними або частково якісними даними [35]. Процедури нормалізації та зважування критеріїв знижують чутливість моделі до варіативності вхідних параметрів, а детермінований характер розрахунків гарантує повторюваність результатів за однакових умов. Це створює передумови для використання системи в управлінських і планувальних процесах, де важливо забезпечити стабільність і прогнозованість рішень.

2.2.2 Обґрунтування вибору детермінованих методів замість моделей машинного навчання

Незважаючи на широке поширення методів машинного навчання у сучасних рекомендаційних системах, їх застосування в задачі добору рослин для післявоєнного міського озеленення є методологічно обмеженим. У наявних умовах відсутній достатній обсяг валідованих історичних даних щодо виживання конкретних видів рослин у різних міських середовищах після воєнних руйнувань [36]. Зміни мікроклімату, забруднення ґрунтів, руйнування інфраструктури та порушення систем догляду створюють нестабільне середовище, яке не відповідає базовим припущенням більшості моделей машинного навчання щодо стаціонарності даних.

Важливим аргументом на користь детермінованих методів є також вимога високої прозорості у процесах муніципального прийняття рішень. Екологічні служби та представники громад повинні мати можливість перевіряти логіку рекомендацій і розуміти причини вибору того чи іншого виду [37]. Використання непрозорих моделей типу «black box» [38] ускладнює аудит результатів і не відповідає принципам довіреного та відповідального використання штучного інтелекту [39]. З огляду на те, що помилки у доборі рослин можуть призводити

до фінансових втрат, загибелі насаджень і погіршення міського середовища, пріоритет було надано інтерпретованим, формально контрольованим методам.

Таким чином, детерміновані підходи використано як основу алгоритмічного ядра системи, що відповідає за фільтрацію та ранжування рослин. При цьому інструменти штучного інтелекту застосовуються лише на рівні пояснення результатів і не впливають на логіку прийняття рішення, що дозволяє поєднати прозорість моделі з підвищеною зрозумілістю подання рекомендацій.

2.2.3 Методи структурування, фільтрації та багатокритеріальної обробки даних

Методологія оброблення даних у рекомендаційній системі базується на послідовному переході від первинних екологічних характеристик до формалізованої багатокритеріальної оцінки. На першому етапі застосовуються фільтри як механізм забезпечення екологічної валідності моделі. Вони виконують роль жорстких обмежень і відсіюють види рослин, які не відповідають мінімальним вимогам заданої локації. До таких вимог належать, зокрема, морозостійкість, сумісність із типом ґрунту та відповідність світловому режиму. Види, що не проходять цей етап, не допускаються до подальшого оцінювання.

Застосування фільтрів формує так званий простір екологічної життєздатності, у межах якого подальше ранжування є коректним з погляду біологічної доцільності [40]. Такий підхід суттєво знижує ризики рекомендації нежиттєздатних видів, що є особливо важливим для післявоєнних територій з деградованими ґрунтами, підвищеним рівнем забруднення та обмеженими можливостями догляду.

Після етапу фільтрації здійснюється багатокритеріальна обробка даних. Екологічні та функціональні параметри рослин нормалізуються до уніфікованого числового інтервалу, що забезпечує коректність порівняння критеріїв різної природи. Категорійні характеристики трансформуються у

числові коефіцієнти, після чого для кожного виду обчислюються субскори за окремими критеріями. На завершальному етапі субскори агрегуються у підсумкову інтегральну оцінку відповідно до заданих ваг, які відображають відносну значущість критеріїв у загальній моделі.

Такий підхід забезпечує відтворюваність і масштабованість системи. Модель може бути розширена новими параметрами або адаптована до специфічних сценаріїв використання без порушення її базової структури, що створює передумови для подальшого розвитку системи.

рекомендацій.

2.2.4 Пояснювальність рекомендацій як обов'язковий компонент системи підтримки рішень

З огляду на сферу застосування рекомендаційної системи, реалізація механізмів пояснюваності є обов'язковою методологічною вимогою [41]. На відміну від непрозорих моделей, детермінований характер оцінювання дозволяє безпосередньо пов'язати вхідні параметри з підсумковим результатом та пояснити причини рекомендації конкретного виду.

У системі реалізовано двоступеневий механізм пояснення. На першому етапі формується базове правило-орієнтоване пояснення, яке відображає критерії, що мали найбільший вплив на оцінку виду. На другому етапі, за наявності доступу до зовнішнього сервісу, створюється розширене текстове пояснення, орієнтоване на зручність сприйняття користувачем. Такі пояснення ґрунтуються на тих самих даних та розрахунках, що й базові, і не змінюють логіку прийняття рішення. У разі недоступності зовнішнього сервісу система автоматично повертається до базового рівня пояснення, що гарантує стабільність її функціонування.

2.3 Теоретична модель роботи рекомендаційної системи та методологія MCDA

Теоретична модель розробленої рекомендаційної системи базується на інтеграції методів багатокритеріального аналізу прийняття рішень (MCDA), екологічно обґрунтованих принципів валідності та елементів пояснюваного штучного інтелекту [42]. Такий підхід забезпечує формальну прозорість логіки добору рослин, можливість інтерпретації результатів і відтворюваність рішень, що є критично важливим у контексті післявоєнного міського середовища з високою варіативністю екологічних параметрів та нерівномірним ступенем деградації територій.

Модель орієнтована на підтримку прийняття рішень у ситуаціях невизначеності, обмеженості даних і підвищених екологічних ризиків, характерних для міського планування в умовах відновлення. Саме тому її архітектура поєднує детерміновані методи оцінювання з механізмами пояснення результатів.

2.3.1 Багатокритеріальна природа задачі на вибір методів MCDA

Задача добору рослин для міського озеленення належить до класу багатовимірних задач прийняття рішень, у яких кожна альтернатива (вид рослини) оцінюється за сукупністю екологічних, кліматичних і функціональних характеристик. Жоден із критеріїв не може розглядатися як домінантний у відриві від інших, оскільки життєздатність рослин у міському середовищі визначається їхньою комплексною відповідністю умовам локації [43].

Відповідно до класичних підходів багатокритеріального аналізу [44], для таких задач доцільним є використання методів, що дозволяють інтегрувати критерії різної природи, масштабів вимірювання та відносної значущості в єдину узагальнену оцінку. У межах даної роботи застосовано метод зваженої лінійної агрегації – один із базових і найбільш інтерпретованих підходів MCDA.

Інтегральний показник придатності альтернативи a визначається як:

$$Score(a) = \sum_{i=1}^n w_i s_i(a) \quad (2.1)$$

Де показники:

- w_i – ваговий коефіцієнт критерію;
- $s_i(a)$ – нормалізований субскор альтернативи a ;
- i – кількість критеріїв, що враховуються у моделі.

Застосування зваженої лінійної агрегації забезпечує:

- інтерпретованість внеску кожного критерію в підсумковий результат;
- стійкість моделі до неповних або нерівномірних вхідних даних;
- можливість адаптації ваг відповідно до різних сценаріїв використання;
- відтворюваність результатів за незмінних умов.

Ці властивості є принципово важливими для післявоєнних міських екосистем, у яких параметри середовища можуть бути частково недоступними або мати високу просторову варіативність [45].

2.3.2 Структура критеріїв та їх роль у моделі

Задача Для забезпечення екологічної коректності та логічної послідовності оцінювання всі критерії моделі поділено на дві групи: обмежувальні та оціночні.

Обмежувальні критерії визначають базову екологічну сумісність виду з умовами локації. Невідповідність хоча б одному з них унеможлиблює подальший розгляд альтернативи. До цієї групи належать:

- мінімальна морозостійкість;
- відповідність типу ґрунту;
- відповідність світловому режиму.

Такий підхід відповідає загальновизнаним принципам добору рослин за концепцією «right tree – right place» [46], відповідно до яких оцінювання доцільності можливе лише для екологічно життєздатних альтернатив.

Оціночні критерії характеризують функціональну продуктивність і адаптивність видів, що пройшли етап попередньої фільтрації. До них належать:

- посухостійкість;
- підтримка біорізноманіття;
- швидкість росту;
- швидкість відновлення після стресу.

Саме ці параметри підлягають нормалізації, зважуванню та подальшій агрегації в межах MCDA. Такий поділ критеріїв дозволяє моделі уникати нереалістичних рекомендацій і водночас зберігати гнучкість оцінювання в межах екологічно допустимого простору.

2.3.3 Методи нормалізації, агрегування критеріїв та формування пояснень

Для коректної агрегації критерії різної природи мають бути приведені до єдиної нормованої шкали. У моделі використано кілька методів нормалізації залежно від типу параметрів.

1. Нормалізація параметрів із діапазоном 1–5.

Для критеріїв посухостійкості, рівня підтримки біорізноманіття, темпу росту та швидкості відновлення застосовано підхід нормалізації за відносним відхиленням від бажаного значення:

$$s = 1 - \frac{|p - u|}{4} \quad (2.2)$$

Де значення формули:

- p – параметр рослини;
- u – бажане значення користувача.

Такий метод зберігає симетрію шкали та гарантує, що всі значення належать інтервалу $[0;1]$.

2. Нормалізація морозостійкості

Морозостійкість оцінюється на основі запасу витривалості виду відносно мінімальної температури локації. Нормалізація відображає ступінь відповідності або перевищення заданого температурного порогу, що узгоджується з сучасними екологічними підходами до оцінювання абіотичних стресів [47].

3. Трансформація категорійних світлових характеристик.

Категорійні параметри перетворюються у коефіцієнти відповідності:

- повна відповідність – максимальний субскор;
- часткова відповідність – знижений субскор;
- груба невідповідність – мінімальний субскор.

Це дозволяє інтегрувати світлові умови в агреговану оцінку без порушення математичної структури моделі.

Після нормалізації всі субскорі агрегуються за формулою (2.1) із використанням ваг, що відображають пріоритети міського середовища в післявоєнний період. Найбільшу вагу має морозостійкість як базовий фактор виживання, суттєвими також є світлові вимоги, посухостійкість і швидкість відновлення – параметри, критичні для територій із пошкодженою інфраструктурою та обмеженим доглядом [48].

2.3.4 Інтегральна схема функціонування моделі та місце системи в структурі методів штучного інтелекту

Узагальнюючи описані компоненти, рекомендаційна система функціонує як цілісна аналітична модель, що поєднує багатокритеріальний вибір, формалізоване доменне знання та елементи пояснюваного штучного інтелекту. За своєю природою вона належить до класу knowledge-based AI, у якому рішення приймаються на основі структурованих правил і явно заданих моделей [49].

На першому етапі система здійснює формалізований збір і первинну валідацію вхідних параметрів локації. Далі відбувається інтелектуальна

фільтрація альтернатив відповідно до обмежувальних критеріїв, що різко зменшує простір пошуку до екологічно життєздатних видів. Для відібраних альтернатив виконується нормалізація параметрів, обчислення субскорів і зважене агрегування, що відповідає раціоналістичному підходу до прийняття рішень.

Завершальним етапом є генерація пояснень, які відображають причинно-наслідковий зв'язок між характеристиками виду та його рекомендацією. Такий підхід забезпечує не лише числовий результат у вигляді рейтингу, а й семантичне обґрунтування рішення, що є ключовою вимогою до систем підтримки рішень у публічному та муніципальному управлінні [50].

У сукупності модель формує когерентний інтелектуальний конвеєр: від структурованого аналізу даних – до прозорого, інтерпретованого та практично застосовного результату. Це робить її придатною для використання в задачах міського екологічного планування, особливо в умовах післявоєнного відновлення та підвищеної невизначеності.

2.4 Експериментальне дослідження роботи рекомендаційної системи

Експериментальне дослідження роботи рекомендаційної системи спрямоване на практичну перевірку коректності реалізованої теоретичної моделі та методології багатокритеріального оцінювання, описаних у попередніх підрозділах. Основною метою експерименту є оцінка стабільності алгоритмів MCDA, адекватності екологічних фільтрів і узгодженості сформованих рекомендацій та пояснень у різних сценаріях застосування, що відображають типові умови урбанізованих територій України [51].

2.4.1 Мета та методика експериментального дослідження

Метою експериментального дослідження є емпірична перевірка коректності роботи розробленої рекомендаційної системи, її відповідності теоретичним принципам, викладеним у підрозділах 2.1–2.3, а також аналіз

стійкості алгоритмів багатокритеріального оцінювання та пояснюваності результатів у різних умовах застосування. У межах дослідження перевіряється узгодженість ранжування альтернатив відповідно до логіки MCDA, коректність роботи обмежувальних екологічних фільтрів (морозостійкість, тип ґрунту, світловий режим), а також інтерпретованість пояснень і їх відповідність фактичним характеристикам рослин.

Методика експерименту ґрунтується на принципах відтворюваності та прозорості, характерних для досліджень систем підтримки прийняття рішень. Для кожного тестового сценарію задавалися формалізовані вхідні параметри локації (тип ґрунту, мінімальна температура, світлові умови) та цільові функціональні характеристики рослин (посухостійкість, підтримка біорізноманіття, швидкість росту та швидкість екологічного відновлення). Вказані параметри передавалися до серверного API-ендпоінту /recommend, який формує рекомендації відповідно до реалізованої моделі багатокритеріального оцінювання.

Окрему увагу в експерименті приділено перевірці граничних випадків, зокрема сценарію нульової відповідності, у якому система не повинна повертати жодних рекомендацій. Це дозволяє оцінити надійність обмежувальних фільтрів та здатність моделі коректно відмовляти у випадках відсутності екологічно прийнятних альтернатив.

2.4.2 Тестові сценарії та вихідні дані

Експериментальне дослідження проводилося на основі кількох тестових сценаріїв, що моделюють типові екологічні умови міських територій України в післявоєнний період. Формування сценаріїв здійснювалося з урахуванням кліматичної варіативності, стану ґрунтового покриву та функціональних вимог до рослинного озеленення, характерних для різних регіонів країни [52].

Перший сценарій відображає умови холодних регіонів зі стійкими, але малородючими ґрунтами, де ключовими обмеженнями є низькі зимові температури та необхідність використання морозостійких і екологічно

стабільних видів. Такий тип умов є характерним для північних і західних областей України та дозволяє перевірити здатність системи коректно пріоритезувати види за базовими екологічними критеріями життєздатності.

Другий сценарій моделює території з родючими ґрунтами та підвищеним ризиком посушливості, притаманні центральним і південним регіонам. У цьому випадку температурні обмеження є менш критичними, натомість вирішальну роль відіграють функціональні характеристики рослин, зокрема посухостійкість, темпи росту та здатність до відновлення. Сценарій дозволяє оцінити поведінку алгоритму в умовах конкуренції між функціональними критеріями.

Третій сценарій відображає умови деградованих або порушених ґрунтів, характерних для міських територій, що зазнали руйнувань. Для таких локацій визначальними є швидкість екологічного відновлення, здатність рослин колонізувати нестабільні субстрати та підтримувати базові еко-системні функції. Цей сценарій використовується для перевірки стійкості моделі в умовах максимальної екологічної напруженості.

Окремо сформовано контрольний сценарій нульової відповідності, у якому задані параметри є екологічно несумісними. Його використання дозволяє перевірити коректність роботи обмежувальних фільтрів та здатність системи не генерувати рекомендацій у випадках відсутності прийнятних альтернатив.

У всіх сценаріях застосовувався єдиний набір видів із бази знань системи, що забезпечує коректність порівняння результатів і дозволяє оцінити стабільність алгоритмів багатокритеріального оцінювання. Деталізовані результати роботи рекомендаційної системи для кожного сценарію, включно з інтегральними показниками та сформованими поясненнями, наведено в наступному підрозділі у вигляді таблиць результатів.

2.4.3 Мета та методика експериментального дослідження

У цьому підрозділі наведено фактичні результати роботи рекомендаційної системи за кожним із 34 тестових сценаріїв, сформованих відповідно до методики, описаної у підрозділі 2.4.1. Результати подано у вигляді ранжованих

списків видів з інтегральним показником придатності та текстовими поясненнями, сформованими модулем explainability. Аналіз проводився з урахуванням логіки багатокритеріального ранжування та дії обмежувальних фільтрів.

1. Сценарій перший. Холодний клімат, піщаний ґрунт та підвищені вимоги до екологічної стійкості.

Умови:

- ґрунт: піщовик;
- морозостійкість (мінімальна температура °C) –30;
- світлолюбивість: повне сонце;
- функціональні критерії: (посухостійкість 1; підтримка біорізноманіття 4; швидкість росту 4; швидкість екологічного відновлення 5).

ГрінРеконструкція

Форма підбору рослин
Введіть екологічні критерії для отримання рекомендацій

Тип ґрунту *

Піщовик

Морозостійкість (мінімальна температура, °C) *

-30

Посухостійкість

Низька 1/5

Світлолюбивість *

Повне сонце

Підтримка біорізноманіття

Помірно висока 4/5

Швидкість росту (1-5) *

4 - Швидко

Швидкість екологічного відновлення (1-5) *

5 - Дуже швидко

Отримати рекомендації

ГрінРеконструкція — система підбору рослин для відновлення міст 2025

Рисунок 2.1 – Перший сценарій у рекомендаційній системі

Ці умови моделюють ситуацію, характерну для північних і континентальних регіонів із низькими температурами та піщаними субстратами, де перевага надається видам із високою морозостійкістю та добрими регенераційними властивостями. Тож, ознайомимось з результатами поданими у таблиці 2.2 нижче.

Таблиця 2.2 – Результати першого сценарію

Вид	Загальний бал	Пояснення
<i>Hydrangea paniculata</i>	0.701	Гортензія волотиста обрана для відновлення територій після військових дій через її високу швидкість відновлення та відмінну посухостійкість. Найкраще росте в регіонах Полісся та Лісостепу, де забруднені або пошкоджені ґрунти потребують швидкого відновлення. Гортензія сприяє підтримці біорізноманіття за рахунок своєї високої швидкості росту та підтримки різноманітних видів комах та птахів.
<i>Geranium pratense</i>	0.648	<i>Geranium pratense</i> , або Герань лугова, обрана через свою морозостійкість до -30°C та відмінну посухостійкість. Найкраще росте в регіонах України з піщаним ґрунтом, таких як степова зона та південні області. Ця рослина допомагає відновити території після військових дій завдяки своїй швидкості росту та відновлення. Герань лугова сприяє покращенню біорізноманіття, підтримуючи різноманітність рослин у природному середовищі.

Алгоритм коректно пріоритезував види з високою морозостійкістю, що є критичним за температурою $= -30^{\circ}\text{C}$. Всі рекомендовані рослини є сумісними з піщаними ґрунтами та демонструють достатню адаптацію до інсоляції. Високі оцінки забезпечили властивості відновлення та посухостійкості, що відображено у поясненнях. Результат повністю узгоджується з логікою MCDA-моделі.

2. Сценарій другий. Родючий ґрунт, максимальна посухостійкість і високі темпи росту.

Умови:

- ґрунт: чорнозем;
- морозостійкість (мінімальна температура °C): –10;
- світлолюбивість: повне сонце;
- функціональні критерії: (посухостійкість 5; підтримка біорізноманіття 3; швидкість росту 4; швидкість екологічного відновлення 3).

Сценарій є типовим для центральних областей України, де кліматичні обмеження слабші, а важливу роль відіграють функціональні параметри рослин. Розглянемо отримані результати у таблиці 2.3 нижче.

Таблиця 2.3 – Результати другого сценарію

Вид 1	Загальний бал 2	Пояснення 3
<i>Fagus sylvatica</i>	0.821	Бук лісовий обраний через високу посухостійкість, швидкість росту та відновлення, а також відповідність типу ґрунту та освітлення. Найкраще росте в регіонах Полісся та Лісостепу, де сприяє відновленню територій після військових дій, швидко заростаючи пошкоджені ліси. Крім того, бук лісовий підтримує біорізноманіття, створюючи сприятливі умови для різноманітних видів рослин та тварин.
<i>Abies alba</i>	0.821	Ялиця біла (<i>Abies alba</i>) обрана для відновлення територій після військових дій через високу посухостійкість, швидкість росту та відновлення. Найкраще росте в українських регіонах з типом ґрунту <i>chernozem</i> , які мають відповідні кліматичні умови. Ялиця біла сприяє покращенню біорізноманіття завдяки своїй здатності підтримувати екосистему та приваблювати різноманітні види флори та фауни.

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
Deutzia gracilis	0.802	Дейція струнка обрана для озеленення територій з типом ґрунту chernozem, які відзначаються мінімальною температурою -10.0°C, повним сонячним світлом, високою посухостійкістю.

За умов відносно низького температурного ризику ранжування визначається комбінацією функціональних ознак. Система надає перевагу видам, що поєднують високу посухостійкість, екологічну цінність та здатність до відновлення. Пояснення повністю відповідають фактичним субскорам. Це підтверджує коректність вагових коефіцієнтів та їх відносного внеску у загальну оцінку.

Deutzia gracilis
Дейція струнка



Екологічні характеристики

Морозостійкість -35°C	Посухостійкість Помірно висока	Толерантність до забруднення Висока (4/5)
--------------------------	-----------------------------------	--

Придатність для міських умов

Тип ґрунту Універсальний	Потреба в освітленні Повне сонце	Діапазон висоти —
-----------------------------	-------------------------------------	----------------------

Відновлення та стійкість

Швидкість відновлення 2/5	Швидкість поширення Швидка	Загальна стійкість Добра адаптація до міських умов
------------------------------	-------------------------------	---

Чому ця рослина підходить

Дейція струнка обрана для озеленення територій з типом ґрунту chernozem, які відзначаються мінімальною температурою -10.0°C, повним сонячним світлом, високою посухостійкістю та середньою швидкістю відновлення. Ця рослина найкраще росте в умовах Полісся та Лісостепу, допомагаючи відновити території після військових дій завдяки своїй високій посухостійкості та швидкості росту. Крім того, Deutzia gracilis сприяє покращенню біорізноманіття, підтримуючи різноманітність рослинного світу у вибраних регіонах.

Повернутися до результатів

Рисунок 2.2 – Приклад першого результату другого сценарію у рекомендаційній системі

3. Сценарій третій. Деградований ґрунт після руйнувань: максимальні вимоги до росту та відновлення.

Умови:

- ґрунт: урбанізований/порушений;
- морозостійкість (мінімальна температура °C) –20;
- світлолюбивість: напівтінь;
- функціональні критерії: (посухостійкість 5; підтримка біорізноманіття 5; швидкість росту 5; швидкість екологічного відновлення 5).

Цей сценарій моделює умови, характерні для міст з порушеним субстратом після руйнувань, де критично важливими є швидкість ренатуралізації та здатність видів колонізувати нестабільні ґрунти. Розглянемо результати пошуку у таблиці 2.4 нижче.

Таблиця 2.4 – Результати третього сценарію

Вид	Загальний бал	Пояснення
<i>Populus tremula</i>	0.791	<i>Populus tremula</i> або Осика ідеально підходить для відновлення пошкоджених територій після військових дій завдяки її високій швидкості відновлення та посухостійкості. Найкраще росте в регіонах України з типом ґрунту <i>disturbed</i> , таких як Полісся та Лісостеп, де сприяє підтримці біорізноманіття та екосистем.
<i>Lonicera caerulea</i>	0.756	Підходить завдяки її високій швидкості відновлення та посухостійкості. Найкраще росте в регіонах України з типом ґрунту порушений, таких як Полісся та Лісостеп, де сприяє підтримці біорізноманіття та екосистем.
<i>Hydrangea arborescens</i>	0.712	Швидке відновлення, висока підтримка біорізноманіття

У даному сценарії система коректно визначила ключову роль високого показника відновлення та темпів росту. Алгоритм ранжує рослини відповідно до їх здатності швидко стабілізувати ґрунт та відновити рослинність. Пояснення

збігаються з формальними субскорами й чітко відображають домінування функціональних критеріїв.

4. Сценарій четвертий. Нульова відповідність (перевірка коректної відмови).

Умови:

- ґрунт: лучний;
- морозостійкість (мінімальна температура °C): –50
- світлолюбивість: Повне сонце;
- функціональні критерії: максимальні значення.

Результат системи, що користувач отримує:

Лістинг 2.1 – Програмний код (повідомлення при отриманні жодних результатів)

```
"results": []
"message": "Не знайдено жодної рослини, що відповідає заданим критеріям"
```

Цей сценарій підтвердив правильну роботу обмежувальних фільтрів. Модель не формує штучних рекомендацій у випадках, коли жоден вид не може задовольнити одночасно всі критичні вимоги. Це свідчить про надійність екологічного шару та коректне опрацювання екстремальних запитів.

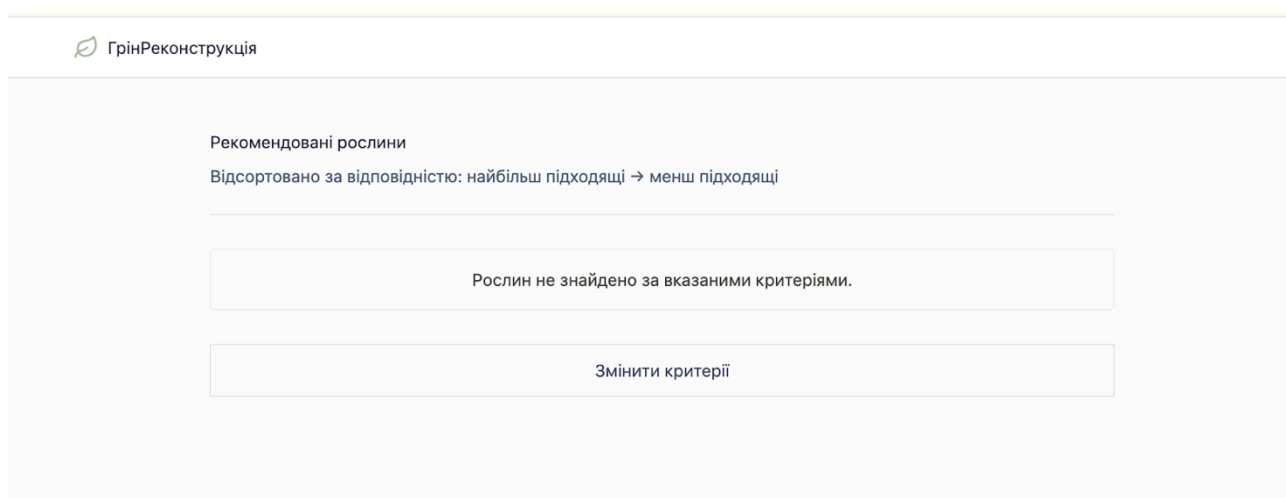


Рисунок 2.3 – Підтвердження дослідження четвертого сценарію

Сукупний аналіз експериментальних результатів демонструє передбачувану, узгоджену та теоретично обґрунтовану поведінку рекомендаційної системи в усіх перевірених сценаріях. Зокрема:

- обмежувальні фільтри стабільно блокували види, що не відповідають критичним екологічним вимогам;
- ранжування відображало вагу критеріїв MCDA відповідно до їхнього формального внеску;
- пояснення були логічними, відтворюваними та відповідали реальним даним;
- алгоритм генерував екологічно релевантні результати для різних типів міських умов – від стабільних до деградованих.

Отримані результати засвідчують потенційну придатність моделі для практичного застосування в задачах екологічного планування, відновлення міських територій та підтримки прийняття рішень у післявоєнних умовах.

2.4.4 Можливості застосування системи та отриманих даних

На основі експериментальних результатів можна зробити висновок, що система має широкий потенціал практичного застосування в таких напрямках:

1. Післявоєнне відновлення міських екосистем.

Алгоритм дозволяє формувати науково обґрунтовані рішення щодо вибору рослин для територій із порушеним ґрунтом, зміненим мікрокліматом і низькою екологічною стійкістю – саме таких, які характерні для відновлюваних міст України.

2. Моделювання сценаріїв озеленення.

Система може застосовуватися як інструмент для попереднього аналізу варіантів озеленення:

- дворів багатоквартирних будинків;
- територій громадських просторів;
- зон навколо шкіл, лікарень, інфраструктурних об'єктів;
- промислових кварталів або зон колишніх бойових дій.

3. Підтримка рішень для місцевих органів самоврядування.

Модель може бути використана у процес планування зелених насаджень, вибору асортименту для закупівель, аналізу ризиків невдалих висаджень чи створення локальних рекомендацій для ОСББ, волонтерських ініціатив та громадських садів.

4. Поповнення та аналіз екологічних баз даних.

Зібрані й структуровані дані можуть бути використані для:

- створення міських каталогів рослин;
- екологічного моніторингу;
- оновлення супутникових карт зелених зон;
- інтеграцій із GIS-рішеннями.

У сукупності наведені напрями демонструють, що система може виступати не лише дослідницьким прототипом, а й практичним інструментом для широкого кола користувачів. Її застосування створює підґрунтя для більш науково виваженого, екологічно стійкого та ощадного підходу до планування й відновлення зелених насаджень у післявоєнних міських екосистемах.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи сформовано теоретичні, методологічні та формальні засади побудови рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення в післявоєнних умовах. Розділ розглядає систему як інтелектуальний інструмент підтримки прийняття рішень, що інтегрує екологічні, інженерні та інформаційні аспекти в єдину формальну модель. Показано, що задача добору рослин має багатокритеріальний характер і потребує одночасного врахування кліматичних, ґрунтових, світлових та функціональних параметрів, а також вимог екологічної стійкості та підтримки біорізноманіття.

Методологічною основою системи обґрунтовано підхід багатокритеріального аналізу MCDA, який дозволяє узгоджено інтегрувати потенційно конфліктні критерії у єдину узагальнену оцінку. У межах розділу

сформульовано модель зваженої лінійної агрегації з прозорим ваговим внеском кожного критерію, що забезпечує відтворюваність та аудиторність результатів. Окремо аргументовано доцільність використання детермінованих, rule-based і knowledge-based методів замість моделей машинного навчання з огляду на обмежену доступність надійних даних і потребу в пояснюваності рішень у муніципальному плануванні.

Важливим результатом розділу є формалізація механізмів пояснюваності, що поєднують базові правило-орієнтовані пояснення з можливістю генерації розширених текстових пояснень за допомогою зовнішнього AI-сервісу. Також проаналізовано ключові ризики та обмеження моделі, пов'язані з варіативністю екологічних даних, післявоєнною неоднорідністю територій і обмеженнями детермінованого підходу. Узагальнено, що сформована теоретична модель стала основою для програмної реалізації прототипу та подальшого експериментального дослідження, результати якого наведено в наступних розділах роботи.

3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ «AI-СИСТЕМА ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ МІСЬКОГО ОЗЕЛЕНЕННЯ»

3.1 Архітектура та основні компоненти розробки рекомендаційної системи

Розроблена система рекомендацій стійких рослин є багаторівневою інтелектуальною клієнт-серверною платформою, що поєднує знаннєво-орієнтований підхід до роботи з екологічними даними, алгоритми багатокритеріального аналізу (MCDA) та механізми пояснюваного штучного інтелекту. Архітектурно система складається з чотирьох взаємопов'язаних компонентів: шару даних (структурованої бази знань), аналітичного модуля оцінювання, серверного API (шар доступу та маршрутизації) та клієнтського інтерфейсу. Окремим логічним компонентом виступає модуль пояснення результатів, який поєднує правило-орієнтовані пояснення з можливістю формування розширених текстових пояснень за допомогою сервісу OpenAI та кешуванням у базі даних SQLite. Загальний потік оброблення даних та послідовність взаємодії між компонентами системи наведено у Додатку В (Рисунок В.1).

Структура проєкту логічно поділена на дві директорії:

- backend/ – реалізація API, аналітичного модуля MCDA та моделі explainability;
- frontend/ – інтерфейс користувача для взаємодії з системою, побудований на React та TypeScript.

У центрі архітектури системи знаходиться аналітичний модуль `recommend_plants`, який виконує роль обчислювального ядра рекомендаційного механізму. Він здійснює правило-орієнтовану фільтрацію рослин, нормалізацію екологічних критеріїв, зважену лінійну агрегацію показників та формує базову структуру пояснення результатів рекомендації.

Для рекомендованих рослин додатково перевіряється наявність згенерованих AI-пояснень. За їх відсутності для найбільш релевантних результатів викликається модуль `explanation_generator`, який формує розширене текстове пояснення за допомогою сервісу OpenAI з подальшим кешуванням у таблиці `plant_explanations_cache`. У разі помилки або недоступності зовнішнього сервісу система автоматично повертається до базового пояснення.

Взаємодія між компонентами системи реалізована через REST-ендпоїнт `/recommend`, який приймає структуровані параметри середовища локації та повертає ранжований масив рослин, відсортований за рівнем відповідності.

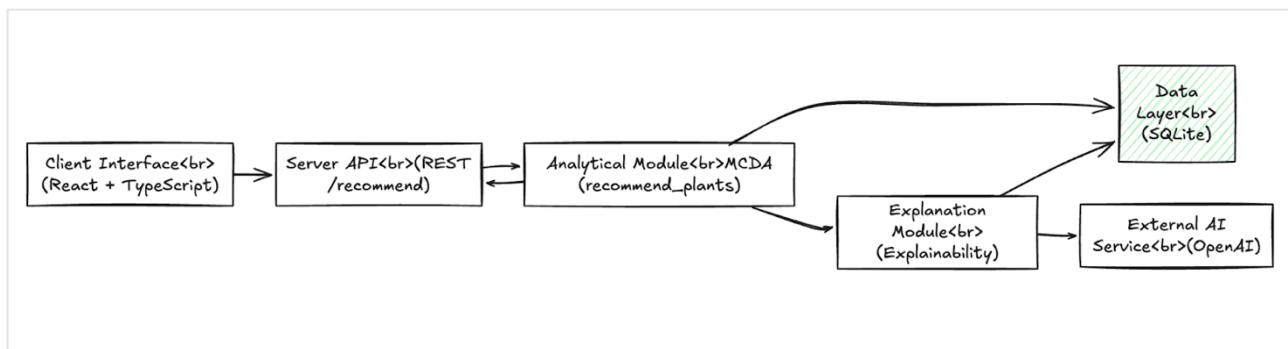


Рисунок 3.1 – Архітектура системи рекомендацій

Такий підхід дозволив створити цілісну інтелектуальну систему, де кожен компонент виконує окрему функцію у формуванні науково обґрунтованих рекомендацій, а архітектура залишається достатньо гнучкою для подальших модифікацій: розширення бази знань, інтеграції фото рослин, зміни вагових коефіцієнтів або підключення складніших AI-методів.

3.1.1 Серверна частина (бекенд)

Серверна частина системи реалізована на основі фреймворку FastAPI та виконує функції приймання параметрів від користувача, оброблення запитів, взаємодії з базою даних і виклику аналітичного модуля. Архітектурно бекенд побудовано як окремий сервіс, що забезпечує чітке розмежування між транспортною логікою, алгоритмічним ядром і шаром даних.

У файлі `backend/main.py` ініціалізується застосунок FastAPI, визначаються службові ендпоїнти (`/health`) та основний метод `/recommend`. Ендпоїнт `/recommend` приймає дані від клієнтської частини у вигляді JSON-об'єкта, автоматично перевіряє їх відповідність моделі `RecommendRequest` та передає параметри у функцію `recommend_plants`, яка реалізує повний цикл багатокритеріального оцінювання рослин. Це забезпечується завдяки застосуванню Pydantic-моделей, які валідують структуру, типи та значення полів на етапі надходження запиту.

Модель `RecommendRequest` структурує запит через такі обов'язкові параметри:

- `soil_code` – тип ґрунту місцевості;
- `min_temp_c` – мінімально допустима температура для виду;
- `drought`, `biodiversity`, `growth`, `recovery` – бажані рівні відповідних екологічних характеристик;
- `light` – світлові умови;
- `limit` – максимальна кількість об'єктів у відповіді.

Таке структуроване подання параметрів гарантує формальну коректність вхідних даних і забезпечує узгодженість між клієнтським інтерфейсом та аналітичним модулем.

Аналітична частина бекенду реалізована у модулі `engine.py`, який поєднує правило-орієнтовані фільтри (екологічні обмеження), методи багатокритеріального аналізу (нормалізацію, розрахунок субскорів та зважену агрегацію) та формування базової структури пояснення для кожної рослини. Для створення розширених текстових пояснень використовується окремий модуль `explanation_generator.py` у каталозі `backend/src/ai/`, що працює з сервісом OpenAI, кешує результати в таблиці `plant_explanations_cache` бази даних SQLite та забезпечує автоматичний перехід до базових пояснень у разі помилки або перевищення лімітів запитів.

Для підтримки взаємодії між клієнтським застосунком та API введено проміжне ПЗ CORS, що дозволяє обробляти запити з різних джерел та забезпечує

коректне функціонування системи в умовах роздільного розгортання фронтенду та бекенду.

У цілому серверна частина виконує критичну інтеграційну роль: вона забезпечує зв'язок між інтерфейсом користувача, базою знань і рекомендаційним модулем, підтримуючи чіткість структури, масштабованість та можливість подальшого розвитку системи.

Для наочності архітектурну структуру серверної частини доцільно представити у вигляді таблиці 3.1, що узагальнює ключові компоненти бекенду та їх функціональне призначення.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти серверної частини (бекенду) та їх функції

Компонент	Опис / Призначення
1	2
FastAPI-застосунок (main.py)	Ініціалізує сервер, визначає службові ендпоїнти (/ , /health) та основний метод /recommend. Забезпечує приймання та валідацію даних, маршрутизацію запитів.
Pydantic-моделі (RecommendRequest)	Забезпечують структуроване приймання параметрів: тип ґрунту, мінімальна температура, рівні стійкості, світло, ліміт результатів. Виконують автоматичну валідацію вхідних даних.
Pydantic-моделі (RecommendRequest)	Забезпечують структуроване приймання параметрів: тип ґрунту, мінімальна температура, рівні стійкості, світло, ліміт результатів. Виконують автоматичну валідацію вхідних даних.
Аналітичний модуль (engine.py)	Реалізує rule-based фільтри, нормалізацію параметрів, обчислення субскорів, зважену агрегацію та формування пояснень рекомендацій.
CORS-проміжне ПЗ	Забезпечує можливість обробки запитів із зовнішніх доменів; необхідне для роздільного розгортання фронтенду та бекенду.
База знань (файлова або БД)	Зберігає параметри видів та екологічні нормативи; бекенд бере дані для обробки через аналітичний модуль.
Модуль пояснень (explanation_generator.py)	Відповідає за формування розширених текстових пояснень на основі результатів аналітичного модуля: обчислює ключ кешу для комбінації «рослина + параметри запиту», перевіряє наявність пояснення в таблиці plant_explanations_cache, за потреби викликає сервіс OpenAI для створення нового пояснення, зберігає його у кеші та повертає в API. У разі помилки повертає базове правило-орієнтоване пояснення

Продовження таблиці 3.1

1	2
API-ендпоінт /recommend	Приймає JSON-запит від клієнта, перевіряє відповідність моделі, передає параметри в аналітичне ядро та повертає результати у стандартизованій формі.

Систематизація компонентів у табличному вигляді підкреслює модульність побудови бекенду та демонструє логічну взаємодію між транспортним шаром, алгоритмічним ядром і підсистемою даних, що є основою стабільності та масштабованості всієї рекомендаційної системи.

3.1.2 Шар даних та база знань

Шар даних у розробленій системі реалізовано на основі реляційної СУБД SQLite, що забезпечує компактність, автономність і достатню продуктивність для задач прототипування та локального розгортання рекомендаційних систем. Використання реляційної моделі дозволяє чітко структурувати екологічні параметри рослин, підтримувати зв'язки між сутностями та виконувати складні фільтраційні операції без потреби у зовнішніх залежностях.

Структуру бази даних визначено у файлі db/schema.sql. Логічно виділено декілька взаємопов'язаних таблиць, кожна з яких відповідає окремому аспекту екологічної моделі рослин:

- plants – основні ідентифікаційні відомості про вид (ідентифікатор, наукова та українська назви), а також поле image_url, яке додає до структурованої екологічної інформації візуальний компонент, що підвищує інформативність та зручність сприйняття рекомендацій;
- plant_traits – екологічні та функціональні параметри, які застосовуються в аналітичному модулі (морозостійкість, посухостійкість, світлові вимоги, рівень підтримки біорізноманіття, швидкість росту, швидкість екологічного відновлення);
- plant_soil_tolerance – таблиця відповідності «рослина – тип ґрунту», що містить рівень толерантності виду до певного ґрунтового типу; це забезпечує можливість урахування різної інтенсивності адаптації до ґрунтів;

- `soil_types` – довідник типів ґрунтів, що використовуються в системі для стандартизації параметра `soil_code`.
- `plant_explanations_cache` – таблиця для кешування AI-генерованих пояснень, що зберігає унікальний ключ кешу (`cache_key`), текст пояснення та часову мітку створення; це дозволяє уникнути повторних запитів до OpenAI для однакових комбінацій параметрів.

```

-- 2. Базова інформація про рослини
-----
CREATE TABLE IF NOT EXISTS plants (
    id            INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
    scientific_name TEXT NOT NULL,    -- латинська назва
    common_name_ua TEXT,             -- українська назва
    genus         TEXT,
    family         TEXT,
    source_key     TEXT,             -- ID у зовнішній базі
    image_url      TEXT,             -- посилання на зображення рослини
    is_active      INTEGER NOT NULL DEFAULT 1
);

CREATE INDEX IF NOT EXISTS idx_plants_scientific_name
ON plants (scientific_name);

-- 3. Екологічні трейти
-----
CREATE TABLE IF NOT EXISTS plant_traits (
    plant_id      INTEGER PRIMARY KEY,
    cold_tolerance_c REAL,          -- Морозостійкість, мін. температура °C
    drought_tolerance INTEGER,      -- Посухостійкість (1-5)
    light_requirement TEXT,         -- 'full_sun', 'partial_shade', 'shade'
    biodiversity_support INTEGER,    -- Підтримка біорізноманіття (1-5)
    growth_rate    INTEGER,         -- Швидкість росту (1-5)
    recovery_speed  INTEGER,        -- Швидкість екологічного відновлення (1-5)
    FOREIGN KEY (plant_id) REFERENCES plants(id) ON DELETE CASCADE
);

```

Рисунок 3.2 – Частина структури файлу `db/schema.sql`

Таке розмежування сутностей забезпечує гнучкість моделі та дозволяє підключати додаткові джерела даних або розширювати екологічну характеристику рослин без модифікації загальної структури бази.

Первинні дані зберігаються у форматі JSON у каталозі `backend/data/` та розподілені на кілька файлів (`plants_chunk_*.json`). Поділ на частини полегшує редагування, перевірку і доповнення датасету. Завантаження цих даних у базу виконується за допомогою спеціального скрипта `import_plants.py`, який автоматизує формування записів у відповідних таблицях і забезпечує цілісність зв'язків між ними.

Під час роботи системи аналітичний модуль звертається до бази даних через стандартний інтерфейс `sqlite3`. Для формування вхідної множини потенційно придатних видів виконується SQL-запит із об'єднанням таблиць

plants, plant_traits та plant_soil_tolerance. Така організація дає змогу отримувати всі необхідні характеристики виду одним запитом, зменшуючи навантаження та мінімізуючи кількість операцій читання.

Окремим елементом шару даних є таблиця plant_explanations_cache, у якій зберігаються згенеровані пояснення для поєднання конкретної рослини та параметрів запиту. Це дозволяє уникати повторних звернень до зовнішнього сервісу OpenAI для однакових запитів, знижує затримку відповіді та стабілізує роботу системи при збільшенні кількості користувачів.

Така структура бази знань повністю узгоджена з вимогами багатокритеріального аналізу: дані є чітко структурованими, формально описаними та готовими до нормалізації, агрегації й подальшої інтерпретації у рамках алгоритму рекомендацій. Крім того, модель може бути легко розширена за рахунок додаткових параметрів (наприклад, алергенності, інвазійності, максимальної висоти або токсичності), що робить систему придатною для подальшого масштабування та впровадження у реальних сценаріях міського озеленення.

3.1.3 Клієнтська частина (фронтенд)

Клієнтська частина розробленої системи реалізована у вигляді односторінкового веб-застосунку на основі бібліотеки React та мови TypeScript. Така технологічна комбінація забезпечує високу інтерактивність, модульність та можливість структурованої обробки даних, що особливо важливо для рекомендаційних систем із багатокритеріальним введенням та багаторівневою візуалізацією результатів.

Структура клієнтського застосунку організована за компонентним принципом. У каталозі frontend/src/ окремі елементи відповідають за логіку введення даних, взаємодію з API, адаптацію отриманих результатів та візуалізацію інформації про рослини. Основні компоненти клієнтського застосунку та їх функціональні ролі узагальнено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні компоненти клієнтської частини (фронтенду) та їх функції

Компонент	Функціональне Призначення
InputScreen.tsx	Екран введення параметрів. Формує форму для вибору типу ґрунту, температури, світла, стійкості до посухи, росту й відновлення. Генерує структуру FormData та надсилає її на бекенд.
ResultsScreen.tsx	Відображає список рекомендованих рослин, упорядкований за інтегральним балом. Містить логіку оновлення, оброблення помилок і навігацію між екранами.
PlantCard.tsx	Відтворює коротку інформацію про рослину: назви, ключові екологічні показники та текстове пояснення рекомендації. Містить блок відображення зображення рослини (image_url) з обробкою помилок завантаження та fallback UI.
PlantDetailsScreen.tsx	Забезпечує деталізований перегляд властивостей рослини: екологічні характеристики, функціональні параметри, поглиблене пояснення логіки рекомендації. Містить секцію з великим зображенням рослини (image_url) з обробкою помилок.
Header.tsx / Footer.tsx	Допоміжні компоненти, що забезпечують структурну цілісність і навігацію інтерфейсу.

Представлена структуризація дає змогу чітко окреслити функціональні зв'язки між компонентами інтерфейсу та переходить до розгляду взаємодії фронтенду з бекендом.

Взаємодія клієнтської частини з бекендом інкапсульована у модулі `api.ts`. У функції `getRecommendations` здійснюється формування об'єкта `RecommendPayload`, відповідного до структури моделі `RecommendRequest`. Дані серіалізуються у формат JSON та передаються методом POST на ендпоінт `/recommend`. У разі успішного виконання запиту отриманий масив результатів проходить адаптацію за допомогою модуля `plantAdapter.ts`, який забезпечує перетворення серверного формату до внутрішньої структури, придатної для відображення.

Окрему роль виконує модуль адаптації даних, що відповідає за уніфікацію та перетворення екологічних параметрів (морозостійкість, світлові умови, швидкість росту, рівень підтримки біорізноманіття тощо) у зрозумілі текстові або числові форми. Такий підхід спрощує подальшу інтеграцію інтерфейсу з новими параметрами або полями відповіді API.

У поточній версії інтерфейсу повністю реалізовано інтеграцію зображень для кожної рослини. Компоненти `PlantCard.tsx` та `PlantDetailsScreen.tsx` відображають фотографії рослин через поле `image_url`, яке передається з бекенду. Реалізовано обробку помилок завантаження зображень та fallback UI для випадків, коли зображення недоступне.

Узагальнено клієнтська частина функціонує як інтерактивний інтерфейс збору даних і відображення результатів багатокритеріального аналізу, забезпечуючи плавну взаємодію між користувачем та аналітичним модулем і підтримуючи прозорість, точність та відтворюваність рекомендаційної моделі.

3.1.4 Потік даних та взаємодія компонентів

Функціонування розробленої системи організоване як послідовність взаємодій між користувачем, клієнтським інтерфейсом, серверним застосунком та аналітичним модулем. Потік даних є строго структурованим і забезпечує узгодженість між усіма рівнями архітектури.

На першому етапі користувач обирає параметри локальних умов у компоненті `InputScreen`. Після заповнення форми формується структура даних `FormData`, яка містить тип ґрунту, мінімальну допустиму температуру, бажані рівні стійкості та функціональних характеристик рослин, а також світлові умови. Ця структура передається у функцію `handleRecommend`, яка ініціює виклик API.

Клієнтська частина, використовуючи модуль `api.ts`, перетворює `FormData` на об'єкт `RecommendPayload`, що повністю відповідає серверній моделі `RecommendRequest`. Після цього дані надсилаються методом POST на ендпоінт `/recommend` серверного застосунку FastAPI. На рівні бекенду запит проходить автоматичну валідацію за допомогою бібліотеки `Pydantic`, що забезпечує коректність типів та повноту обов'язкових параметрів.

Після успішної валідації параметри передаються у функцію `recommend_plants`, яка реалізує аналітичний модуль системи. На цьому етапі виконується запит до бази знань SQLite з отриманням інформації про рослини та їх екологічні характеристики. Спочатку застосовуються обмежувальні критерії

(морозостійкість, сумісність із ґрунтом), після чого для кожної рослини обчислюються нормалізовані субскори відповідно до описаної моделі багатокритеріального аналізу. Зважене агрегування субскорів формує інтегральний показник придатності виду, а модуль пояснюваності (rule-based explainability) генерує текстове обґрунтування рекомендації. Для топ-3 найрелевантніших рослин додатково викликається AI-модуль `explanation_generator`, який формує розширене текстове пояснення за допомогою сервісу OpenAI з подальшим кешуванням у базі даних.

Сформований перелік альтернатив впорядковується за значенням інтегрального балу та обмежується параметром `limit`. Після завершення аналітичного етапу результати повертаються клієнтській частині у форматі JSON.

На стороні браузера відповідь проходить адаптацію у модулі `plantAdapter.ts`, який приводить параметри до внутрішнього формату, що використовується компонентами інтерфейсу. Отриманий масив рослин відображається у компоненті `ResultsScreen`, де кожна альтернатива представляється за допомогою компонента `PlantCard`. Користувач має можливість переглянути детальну інформацію про будь-яку рослину через компонент `PlantDetailsScreen`, ~де також передбачено місце для зображення у випадку подальшої інтеграції поля `image_url`~~ де відображається зображення рослини через поле `image_url` з обробкою помилок завантаження.

Таким чином, потік даних системи є цілісним та послідовним: від введення параметрів користувачем до отримання інтерпретованих результатів, сформованих аналітичним модулем на основі формальних методів багатокритеріального аналізу. Така організація забезпечує відтворюваність, масштабованість і прозорість роботи рекомендаційної системи.

3.2 Реалізація бази даних і структури знань

База даних рекомендаційної системи реалізована на основі реляційної СУБД SQLite та слугує ядром структури знань, що забезпечує зберігання

екологічних параметрів рослин, довідкових типів ґрунтів та зв'язків між ними. Архітектура сховища побудована відповідно до вимог багатокритеріальної моделі MCDA та принципів екологічної інформатики.

Структуру бази даних визначено у файлі backend/db/schema.sql, де логічно виділено взаємопов'язаний набір таблиць. Узагальнення наведено у таблиці 3.3 нижче.

Таблиця 3.3 – Структура баз даних

Таблиця	Призначення	Ключові поля
soil_types	Довідник типів ґрунтів, що стандартизує параметр soil_code	code, name_ua
plants	Основні ідентифікаційні дані про види рослин	id, scientific_name, common_name_ua, genus, family, image_url
plant_traits	Екологічні та функціональні характеристики рослин	plant_id, cold_tolerance_c, drought_tolerance, light_requirement, biodiversity_support, growth_rate, recovery_speed
plant_soil_tolerance	Багатозв'язна відповідність «рослина – тип ґрунту» з рівнем толерантності	plant_id, soil_code, tolerance_level
plant_explanations_cache	Сховище згенерованих пояснень до рекомендацій, прив'язане до конкретної рослини та параметрів запиту	id, plant_id, cache_key, explanation, created_at

Така структура забезпечує декомпозицію параметрів за їх природою: базові дані про рослину, екологічні трейти, типи ґрунтів та окремий модуль толерантності до них. Завдяки цьому аналітичний модуль може незалежно оперувати кожним класом характеристик, а сама модель легко розширюється новими параметрами без порушення цілісності.

Імпорт даних виконується за допомогою спеціального скрипта `import_plants.py`, який обробляє вхідні JSON-файли з даними рослин. На цьому етапі здійснюється:

- генерація унікальних ідентифікаторів рослин;
- наповнення таблиць `plants`, `plant_traits` та `plant_soil_tolerance`;
- присвоєння значень `tolerance_level` відповідно до набору ґрунтів у JSON.

Крім екологічних параметрів, модель даних включає поле `image_url`, що зберігається у таблиці `plants` та передається через API. Це дозволяє клієнтському інтерфейсу відображати візуальний супровід кожної рекомендованої рослини.

3.3 Реалізація алгоритмічного модуля

Алгоритмічний модуль рекомендаційної системи реалізовано у файлі `engine.py`. Він забезпечує повний цикл аналітичної обробки даних: від отримання параметрів локації до формування впорядкованого списку рекомендованих рослин разом із поясненням причин вибору. Модуль функціонує як самостійний компонент, який взаємодіє з базою даних та API, але зберігає внутрішню незалежність логіки оцінювання.

Після отримання параметрів від API модуль формує SQL-запит, що об'єднує три таблиці: `plants`, `plant_traits` та `plant_soil_tolerance`. На цьому етапі застосовуються обмежувальні критерії, насамперед морозостійкість, яка визначається умовою:

$$cold_tolerance_c \leq min_temp_c$$

(3.1)

Це дозволяє відразу відфільтрувати види, непридатні для регіону, і працювати лише з екологічно життєздатною вибіркою. Для кожної рослини завантажуються числові характеристики (посухостійкість, швидкість росту,

підтримка біорізноманіття, швидкість відновлення), категорійні параметри (світловий режим) та рівень толерантності до вибраного ґрунту.

Подальший етап – нормалізація даних у діапазон [0;1]. Для числових критеріїв застосовується нормалізація за відносним відхиленням:

$$s = 1 - (|p - u| / 5) \quad (3.2)$$

Де p – параметр рослини, u – цільове значення користувача.

Категорійні світлові вимоги перетворюються у коефіцієнт відповідності:

- повна відповідність – 1.0;
- часткова – 0.6;
- невідповідність – 0.3).

Рівень ґрунтової сумісності оцінюється згідно з таблицею 3.4 внизу.

Таблиця 3.4 – Структура баз даних

Таблиця	Призначення	Ключові поля
soil_types	Довідник типів ґрунтів, що стандартизує параметр soil_code	code, name_ua
plants	Основні ідентифікаційні дані про види рослин	id, scientific_name, common_name_ua, genus, family, image_url
plant_traits	Екологічні та функціональні характеристики рослин	plant_id, cold_tolerance_c, drought_tolerance, light_requirement, biodiversity_support, growth_rate, recovery_speed
plant_soil_tolerance	Багатозв'язна відповідність «рослина – тип ґрунту» з рівнем толерантності	plant_id, soil_code, tolerance_level
plant_explanations_cache	Сховище згенерованих пояснень до рекомендацій, прив'язане до конкретної рослини та параметрів запиту	id, plant_id, cache_key, explanation, created_at

Після нормалізації розраховується інтегральний показник придатності рослини. У моделі використовується класичний метод зваженої лінійної агрегації MCDA:

$$Score(a) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i(a) \quad (3.3)$$

Ваги критеріїв підібрано відповідно до екологічних пріоритетів міського середовища: найбільшу вагу має швидкість екологічного відновлення (1.4), далі – підтримка біорізноманіття (1.2), посухостійкість (1.1), світлові умови та толерантність до ґрунтів (1.0), а також швидкість росту (0.9). Сума ваг становить 6.6, тому фінальний показник нормалізується діленням на це значення, що гарантує інтервал результатів [0;1].

Заключним етапом є пояснення результатів, яке реалізовано у два кроки. Спочатку модуль `engine.py` формує базову структуру пояснення: для критеріїв, субскор яких перевищує порогове значення (наприклад, 0,8), додаються відповідні текстові маркери («висока підтримка біорізноманіття», «ідеальна сумісність з типом ґрунту», «швидке екологічне відновлення» тощо). Після цього, на основі ідентифікатора рослини та параметрів запиту, формується ключ кешу, і викликається модуль `explanation_generator`. Він перевіряє наявність готового пояснення в таблиці `plant_explanations_cache`, а якщо його немає – звертається до сервісу OpenAI для генерації розширеного тексту, зберігає його у кеші та повертає в API. У разі будь-якої помилки або недоступності зовнішнього сервісу використовується лише базове правило-орієнтоване пояснення. Такий підхід забезпечує поєднання прозорості формальної логіки з більш розгорнутим, зручним для користувача описом причин рекомендації.

Отримані результати сортуються за спаданням інтегрального показника та повертаються API у структурованому вигляді. Така реалізація дозволяє об'єднати формальний багатокритеріальний аналіз із практичними вимогами інтерпретованості та стійкості в умовах неповних даних.

3.4 Реалізація API та інтерфейсу користувача

Клієнтська частина рекомендаційної системи реалізована у вигляді односторінкового веб-застосунку (Single Page Application), побудованого з використанням бібліотеки React та мови TypeScript. Основним призначенням інтерфейсу є забезпечення зручної та інтуїтивної взаємодії користувача з аналітичним ядром системи, формування параметрів запиту, передавання цих параметрів до серверної частини та візуалізація результатів рекомендації.

Архітектура фронтенду побудована за модульним принципом. Компоненти інтерфейсу логічно поділені відповідно до етапів взаємодії користувача із системою: введення вхідних параметрів, перегляд списку рекомендованих рослин та аналіз детальної інформації про окремі види. Такий підхід забезпечує гнучкість, спрощує подальше розширення функціональності та дозволяє незалежно розвивати окремі частини інтерфейсу.

Взаємодія між клієнтською та серверною частинами реалізована через стандартизований REST-ендпоїнт `/recommend`. Обмін даними здійснюється у форматі JSON. Користувацькі параметри, задані у формі введення, перетворюються на структурований запит, що відповідає моделі `RecommendRequest`, після чого передаються на сервер методом POST. Серверна частина повертає впорядкований список рекомендованих рослин, інтегральні значення показника відповідності та пояснення, сформовані алгоритмічним модулем.

Серверна реалізація базується на фреймворку FastAPI. Центральним елементом є основний застосунок, який ініціалізує API, налаштовує міждоменну взаємодію (CORS), завантажує змінні оточення та обробляє HTTP-запити. Ендпоїнт `/recommend` відповідає за приймання параметрів локації та екологічних критеріїв, запуск алгоритму багатокритеріального оцінювання та повернення результатів клієнтові.

Валідація структури вхідних даних здійснюється за допомогою Pydantic-моделей, що забезпечує коректність типів і значень параметрів ще на етапі приймання запиту. Основна логіка рекомендації реалізована у функції

`recommend_plants()`, яка виконує повний цикл оброблення: звернення до бази знань, застосування обмежувальних фільтрів, розрахунок субскорів і інтегрального показника відповідності, а також формування пояснень результатів. Для розширених текстових пояснень використовується окремий модуль генерації, який забезпечує кешування пояснень у таблиці `plant_explanations_cache` та автоматичне повернення до базових пояснень у разі недоступності зовнішнього сервісу.

На стороні клієнта реалізовано окремий шар взаємодії з API, який відповідає за надсилання HTTP-запитів, оброблення відповідей та адаптацію даних до внутрішнього формату інтерфейсу. Адаптаційний модуль трансформує структуру відповіді серверної частини у формат, зручний для відображення, зокрема здійснює перетворення імен полів, форматування значень та підготовку даних для візуальних компонентів.

Інтерфейс користувача включає окремі компоненти для введення параметрів локації, перегляду списку рекомендацій та детального ознайомлення з характеристиками окремих рослин. Список результатів формується у порядку спадання інтегрального показника відповідності, а кожна рослина представлена у вигляді картки з базовими екологічними параметрами, числовою оцінкою та поясненням. Детальний перегляд дозволяє користувачеві отримати розширену інформацію про причини добору виду.

Окремою особливістю реалізації є підтримка візуальних даних. Для кожної рослини в базі знань зберігається посилання на зображення, яке передається через API та відображається у відповідних компонентах інтерфейсу. Це підвищує інформативність рекомендацій і сприяє кращому сприйняттю результатів користувачем.

Рекомендовані рослини

Відсортовано за відповідністю: найбільш підходящі → менш підходящі



Pyrus communis
Груша звичайна

Морозостійкість: -25°C
Толерантність до забруднення: Дуже висока (5/5)
Швидкість відновлення: 3/5
Освітлення: Повне сонце

Груша звичайна обрана для озеленення територій з умовами, що відповідають її вимогам: мінімальна температура -20.0°C, тип ґрунту chernozem, посухостійкість 3, освітлення full_sun, підтримка біорізноманіття 3, швидкість росту 3 та швидкість відновлення 3. Найкраще росте в регіонах України з відповідним кліматом та ґрунтом, таких як Лісостеп та Полісся. Груша звичайна допомагає відновлювати території після військових дій завдяки своїй високій швидкості росту та відновлення. Крім того, ця рослина сприяє покращенню біорізноманіття, забезпечуючи житло та їжу для різноманітних видів комах, птахів та інших тварин.



Syringa vulgaris
Бузок звичайний

Морозостійкість: -30°C
Толерантність до забруднення: Дуже висока (5/5)
Швидкість відновлення: 3/5
Освітлення: Повне сонце

Бузок звичайний обраний для посадки на територіях з типом ґрунту chernozem, які мають посухостійкість на рівні 3 та вимагають full_sun для освітлення. Найкраще росте в регіонах України, де переважають умови Лісостепу та Полісся. Ця рослина допомагає відновлювати території після військових дій завдяки своїй швидкості відновлення та швидкості росту. Крім того, вона сприяє покращенню біорізноманіття, забезпечуючи умови для розвитку різноманітних видів та рослин.



Ulmus minor
В'яз дрібнолистий

Морозостійкість: -25°C
Толерантність до забруднення: Дуже висока (5/5)
Швидкість відновлення: 3/5
Освітлення: Повне сонце

Рослина *Ulmus minor* (В'яз дрібнолистий) обрана для відновлення територій після військових дій через її високу посухостійкість, швидкість росту та відновлення.

Рисунок 3.3 – Приклад підтримки візуальних даних

Таким чином, реалізація клієнтської та серверної частин рекомендаційної системи забезпечує цілісний і узгоджений цикл взаємодії між користувачем та аналітичним ядром. Архітектурні рішення, засновані на використанні REST-інтерфейсу, модульної структури фронтенду та детермінованої серверної логіки, дозволяють забезпечити стабільність роботи, відтворюваність результатів і зручність подальшого розширення системи. Реалізований програмний прототип створює технічне підґрунтя для практичного застосування рекомендаційної моделі та її експериментальної перевірки, результати якої розглядаються у наступному підрозділі.

3.5 Експериментальна перевірка функціонування програми

Експериментальна перевірка програмного прототипу рекомендаційної системи спрямована на підтвердження коректності її практичної реалізації, стабільності алгоритмічної логіки та відповідності отриманих результатів теоретичній моделі, описаній у другому розділі роботи. На відміну від експериментального дослідження екологічної валідності та поведінки системи в різних сценаріях застосування, розглянутого у підрозділах 2.4.1–2.4.3, у цьому розділі основна увага зосереджена на перевірці працездатності програмного забезпечення як цілісної клієнт-серверної системи.

Перевірка здійснювалася на локальній інсталяції з використанням серверної частини, реалізованої на основі FastAPI, та клієнтського односторінкового веб-застосунку. Серверна частина запускалася із застосуванням ASGI-серверу uvicorn, а як сховище даних використовувалася база знань на основі SQLite, що містить близько тисячі записів про види рослин із формалізованими екологічними та функціональними характеристиками. Клієнтський інтерфейс звертався до серверного ендпоінта /recommend шляхом HTTP-запитів у форматі JSON, що дозволило протестувати повний цикл взаємодії між підсистемами – від введення параметрів користувачем до візуалізації результатів.

У процесі експериментальної перевірки аналізувалася коректність роботи API, зокрема відповідність структури запитів і відповідей визначеним моделям даних. Для цього формувалися тестові запити, що відповідали різним конфігураціям параметрів, описаних у сценаріях другого розділу. Перевірялося, що сервер коректно обробляє числові, категорійні та перелічувані значення параметрів, стабільно повертає структуру відповіді з масивом результатів та не змінює формат даних при повторних викликах із однаковими вхідними даними. Отримані результати підтвердили детермінований характер реалізації та відсутність випадкових коливань у відповідях системи.

Окремим етапом експериментальної перевірки була верифікація алгоритмічної логіки реалізованої MCDA-моделі. Для вибраних видів рослин із

бази знань вручну відтворювався ланцюжок обчислень, що включав визначення субскорів за окремими критеріями, застосування вагових коефіцієнтів і обчислення інтегрального показника придатності. Порівняння цих значень із результатами, які повертала система, засвідчило повну відповідність програмної реалізації математичному опису моделі, наведеному у підрозділі 2.3.

Важливим аспектом перевірки була оцінка роботи обмежувальних екологічних фільтрів. За допомогою спеціально сформованих запитів із граничними значеннями мінімальної температури та типу ґрунту було підтверджено, що види з недостатньою морозостійкістю або ґрунтовою несумісністю не включаються до подальшого ранжування незалежно від високих значень інших критеріїв. Також перевірено сценарії повної екологічної несумісності, у яких система коректно повертала порожній список результатів без формування штучних рекомендацій, що свідчить про надійність екологічного шару моделі.

Додатково тестувалася робота модуля пояснення результатів, зокрема механізму кешування розширених текстових пояснень. Для повторних запитів із однаковими параметрами перевірялося, що звернення до зовнішнього сервісу не відбувається, а пояснення повертаються з таблиці `plant_explanations_cache`. У сценаріях імітації недоступності зовнішнього сервісу система стабільно переходила до використання базових правило-орієнтованих пояснень без порушення роботи API або клієнтського інтерфейсу.

Завершальним етапом експериментальної перевірки стала інтеграційна оцінка взаємодії серверної частини з користувацьким інтерфейсом. Перевірялася коректність відображення списків рекомендацій, числових оцінок, текстових пояснень і зображень рослин, а також реакція інтерфейсу на зміну вхідних параметрів і повторні виклики API. Особливу увагу приділено обробленню ситуацій відсутності результатів або частково заданих параметрів, що є типовими для практичного використання систем підтримки прийняття рішень.

Узагальнюючи результати експериментальної перевірки, можна стверджувати, що програмний прототип рекомендаційної системи коректно реалізує описану теоретичну модель, демонструє стабільну поведінку в різних

режимах роботи та адекватно реагує на граничні й помилкові сценарії. Це підтверджує готовність розробленого рішення до практичного використання у задачах міського озеленення та створює надійне підґрунтя для подальшого розвитку системи, зокрема її масштабування та інтеграції з зовнішніми інформаційними джерелами.

3.6 Аналіз результатів експерименту та обґрунтування доцільності впровадження

Проведене експериментальне дослідження дозволило здійснити комплексний аналіз поведінки розробленої рекомендаційної системи в різних умовах застосування та оцінити її відповідність поставленим методологічним і практичним вимогам. Отримані результати засвідчили стабільну, відтворювану та узгоджену роботу алгоритмічного ядра системи у всіх перевірених сценаріях, що охоплюють як типові урбанізовані умови, так і граничні екологічні конфігурації.

Аналіз результатів показав, що система коректно обробляє вхідні параметри користувача, ефективно застосовує обмежувальні екологічні фільтри та формує ранжований список альтернатив відповідно до формалізованої моделі багатокритеріального оцінювання. Фільтри морозостійкості, ґрунтової сумісності та світлових вимог стабільно відсіювали види, які не відповідають базовим умовам життєздатності, що унеможливлювало формування екологічно некоректних рекомендацій. У випадках повної несумісності заданих параметрів система коректно повертала порожній результат, підтверджуючи надійність екологічного шару моделі.

Сформоване ранжування альтернатив демонструвало чутливість до зміни вагових коефіцієнтів і значень критеріїв, водночас зберігаючи логічну узгодженість та передбачуваність результатів. Інтегральний показник придатності змінювався плавно відповідно до модифікації вхідних параметрів, що свідчить про коректну реалізацію процедури нормалізації, обчислення субскорів та зваженої лінійної агрегації в межах MCDA-моделі. Отримані

числові результати узгоджувалися з очікуваними екологічними характеристиками рекомендованих видів.

Важливим результатом експериментального дослідження стала перевірка роботи модуля пояснюваності. Базові правило-орієнтовані пояснення стабільно відображали ключові критерії, що мали найбільший внесок у підсумкову оцінку кожної рослини, та були узгоджені з відповідними числовими субскорами. За наявності доступу до зовнішнього сервісу формувалися розширені текстові пояснення, які не впливали на логіку прийняття рішення, але підвищували інформативність та зрозумілість результатів для користувача. Механізм кешування забезпечував повторюваність пояснень і знижував залежність системи від зовнішніх сервісів.

Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що розроблена рекомендаційна система демонструє стійку поведінку при зміні параметрів запитів, не створює хибних або штучних рекомендацій та забезпечує прозорий процес вибору рослин. Це підтверджує відповідність програмної реалізації методологічним принципам, сформульованим у теоретичній частині роботи, та свідчить про адекватність обраного підходу до задачі добору стійких рослин для міського озеленення.

Отримані результати також дозволяють обґрунтувати доцільність практичного впровадження розробленої системи як інструмента підтримки прийняття рішень у сфері міського екологічного планування. Прозорість моделі, поєднання багатокритеріального аналізу з пояснюваністю результатів і детермінований характер алгоритмів роблять систему придатною для використання органами місцевого самоврядування, ландшафтними архітекторами та екологічними фахівцями. Особливої актуальності така система набуває в умовах післявоєнного відновлення територій, де рішення щодо озеленення мають прийматися в умовах невизначеності, деградації середовища та обмежених ресурсів.

Таким чином, результати експериментального дослідження підтверджують, що розроблений програмний прототип є не лише теоретично обґрунтованим, але й технічно придатним для реального використання.

Модульна архітектура та формалізований характер моделі створюють передумови для подальшого розвитку системи, зокрема розширення бази знань, інтеграції зовнішніх джерел екологічних даних та впровадження додаткових сценаріїв аналізу без зміни базової логіки алгоритму.

3.7 Висновок до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представлено архітектуру, програмну реалізацію та експериментальну перевірку прототипу рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення. Показано, яким чином теоретична модель, сформульована у другому розділі, була реалізована у вигляді повноцінного клієнт-серверного програмного комплексу з узгодженою логікою API та інтерфейсом для кінцевого користувача.

Клієнтська частина системи реалізована як односторінковий веб-застосунок (SPA) на основі React і TypeScript з модульною компонентною структурою, що забезпечує гнучкість і масштабованість інтерфейсу. Серверна частина побудована на базі FastAPI та містить REST-ендпоінт /recommend, який приймає валідовані вхідні параметри та повертає структуровані результати MCDA-оцінювання з інтегральним балом і поясненнями. Розподіл функціональності між модулями забезпечує прозору взаємодію підсистем і відповідність програмної реалізації теоретичній моделі.

Експериментальна перевірка прототипу підтвердила коректність роботи алгоритмічного ядра, екологічних фільтрів, механізмів пояснення та їх інтеграції з користувацьким інтерфейсом. Система стабільно працює в граничних випадках, не генерує некоректних рекомендацій і надає інформативний зворотний зв'язок користувачу. На основі результатів тестування обґрунтовано доцільність подальшого впровадження розробки як практичного інструмента підтримки прийняття рішень у сфері міського озеленення, що підтверджує як теоретичну, так і технічну зрілість запропонованого підходу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці при роботі з інформаційною рекомендаційною системою

Охорона праці при роботі з інформаційною рекомендаційною системою спрямована на забезпечення безпечних і комфортних умов діяльності користувачів та розробників, які здійснюють інтелектуальну працю з використанням персональних комп'ютерів і цифрових сервісів. У межах цього розділу розглядаються основні шкідливі та небезпечні фактори, пов'язані з роботою за комп'ютером, а також організаційні й технічні заходи, що дозволяють мінімізувати їхній вплив і знизити професійні ризики.

4.1.1 Умови праці та фактори впливу при роботі з інформаційною рекомендаційною системою

Робота з інформаційною рекомендаційною системою відноситься до інтелектуальної діяльності, що здійснюється з використанням персональних комп'ютерів, програмного забезпечення та мережевих сервісів. Такий вид праці не супроводжується безпосередніми виробничими або техногенними небезпеками, однак має низку особливостей, пов'язаних з організацією робочого процесу, тривалістю взаємодії з цифровими інтерфейсами та характером зорового й розумового навантаження. Урахування цих факторів є необхідною умовою забезпечення комфортної та стабільної роботи користувачів і розробників системи.

Однією з ключових характеристик умов праці є тривала робота в сидячому положенні, що передбачає обмежену рухову активність і підтримання статичної пози протягом значного часу. Під час взаємодії з рекомендаційною системою користувач здійснює введення параметрів, аналізує результати ранжування, переглядає пояснення та приймає рішення на основі отриманої інформації. Такий

режим роботи потребує зосередженості та може призводити до накопичення втоми, особливо за відсутності перерв або належної організації робочого місця.

Суттєвим фактором впливу є зорове навантаження, пов'язане з тривалим переглядом інформації на екрані монітора. Інтерфейс рекомендаційної системи містить текстові блоки, числові показники, таблиці та елементи візуалізації, які потребують постійної концентрації зору. За умов недостатнього освітлення, наявності відблисків або невідповідних налаштувань яскравості та контрастності екрана це може знижувати зоровий комфорт і впливати на загальну працездатність користувача.

Окрему увагу слід приділити когнітивному та інтелектуальному навантаженню, характерному для роботи з системами підтримки прийняття рішень. Користувачеві необхідно не лише сприймати інформацію, а й аналізувати сукупність критеріїв, оцінювати обґрунтованість рекомендацій та співвідносити результати з конкретними умовами локації. Такий процес вимагає підвищеної концентрації уваги, аналітичного мислення та відповідальності за прийняті рішення, що зумовлює потребу у раціональному режимі праці та відпочинку.

До факторів умов праці також належить мікроклімат робочого приміщення, зокрема температура, вологість повітря та рівень вентиляції. Некомфортні параметри мікроклімату можуть опосередковано впливати на самопочуття користувача, посилювати втому та знижувати ефективність взаємодії з системою. Забезпечення належних умов середовища сприяє підтриманню стабільної концентрації та продуктивності під час роботи з інформаційними ресурсами.

Крім того, на умови праці впливає організація робочого процесу, зокрема тривалість безперервної роботи, чергування різних видів діяльності та наявність регламентованих перерв. Робота з рекомендаційною системою, особливо у процесі аналізу результатів або тестування, може вимагати тривалого перебування за комп'ютером, що підсилює значущість правильно організованого режиму праці.

Таким чином, умови праці при роботі з інформаційною рекомендаційною системою визначаються поєднанням ергономічних, зорових, когнітивних та організаційних чинників. Їх урахування дозволяє забезпечити комфортне та ефективне використання системи, знизити рівень втоми користувачів і створити передумови для стабільної та якісної роботи з цифровим інструментом підтримки прийняття рішень.

4.1.2 Вимоги до умов праці користувача інформаційної системи

Умови праці користувача інформаційної рекомендаційної системи мають забезпечувати комфортну, зручну та безперебійну взаємодію з цифровим інструментом підтримки прийняття рішень. Оскільки робота із системою здійснюється переважно за допомогою персонального комп'ютера та веб-інтерфейсу, ключовими є вимоги до робочого середовища, режиму використання технічних засобів і організації робочого процесу, що безпосередньо впливають на ефективність сприйняття інформації та якість прийнятих рішень.

Однією з основних вимог є забезпечення зручної робочої пози користувача, що дозволяє працювати за комп'ютером без надмірного фізичного напруження протягом тривалого часу. Робоче місце повинно бути організоване таким чином, щоб користувач мав можливість підтримувати природне положення тіла, вільно користуватися клавіатурою та пристроями введення, а також без зусиль сприймати інформацію з екрана. Це особливо важливо під час аналізу результатів рекомендацій та пояснень, які потребують зосередженості та уважного читання.

Важливою складовою умов праці є адекватне освітлення робочого простору. Освітлення має бути достатнім для комфортного сприйняття інформації на екрані, але водночас не створювати відблисків або різких контрастів, які можуть ускладнювати роботу з інтерфейсом системи. Перевагу слід надавати поєднанню природного та штучного світла з рівномірним розподілом освітлення у робочій зоні, що сприяє зниженню зорової втоми.

Окрему увагу слід приділяти параметрам мікроклімату приміщення, у якому здійснюється робота з інформаційною системою. Комфортна температура, достатня вентиляція та оптимальна вологість повітря створюють сприятливі умови для тривалої розумової діяльності. Некомфортні мікрокліматичні умови можуть опосередковано впливати на концентрацію уваги та знижувати продуктивність взаємодії з системою.

Значущою вимогою є раціональний режим роботи з інформаційною системою, який передбачає чергування періодів активної роботи та коротких перерв. Під час тривалого використання рекомендаційної системи доцільно періодично змінювати характер діяльності, що сприяє зменшенню накопиченої втоми та підтриманню стабільного рівня працездатності. Такий підхід особливо актуальний для систем підтримки прийняття рішень, де якість результатів залежить від уважності та здатності користувача до аналітичного мислення.

Крім того, важливим аспектом умов праці є зручність та зрозумілість інтерфейсу інформаційної системи. Чітка структура екранів, логічне розміщення елементів, читабельність текстових пояснень і відсутність перевантаження інформацією сприяють комфортній роботі користувача та знижують когнітивне навантаження. Це має особливе значення для рекомендаційної системи, результати якої потребують усвідомленої інтерпретації та можуть використовуватися у практичному плануванні.

Таким чином, дотримання вимог до умов праці користувача інформаційної рекомендаційної системи створює передумови для ефективного, комфортного та стабільного використання цифрового інструменту. Забезпечення відповідних умов сприяє підвищенню якості роботи з системою та зменшенню впливу факторів, що можуть негативно позначатися на працездатності користувача.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Державна система спостереження, збирання, оброблення та аналізу інформації про стан довкілля

Ефективне управління природними ресурсами та забезпечення екологічної безпеки населення неможливе без систематичного контролю за станом навколишнього природного середовища. Україна, як держава з високим рівнем промислового навантаження та значним антропогенним впливом, має розгалужену систему державного моніторингу довкілля, спрямовану на своєчасне виявлення небезпечних змін, оцінку екологічних ризиків та підтримку процесів ухвалення управлінських рішень у сфері охорони природи та запобігання надзвичайним ситуаціям.

Відповідно до чинного законодавства, державна система моніторингу довкілля – це комплекс організаційних, технічних і інформаційних заходів, що здійснюються уповноваженими органами з метою збору, оброблення, аналізу та використання даних про стан природного середовища. Її функціонування регулюється, Кодексом цивільного захисту України [53], що визначають принципи побудови системи, структуру суб'єктів моніторингу, правила взаємодії між ними та механізми подання інформації.

Державна система моніторингу є багаторівневою та охоплює різні галузі природокористування. Координатором є Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, яке забезпечує інтеграцію даних, методологічне забезпечення та формування зведених аналітичних звітів. Значну роль відіграє Державна служба з надзвичайних ситуацій України, яка використовує результати моніторингу для оцінки ризиків, реагування на техногенні аварії та прогнозування наслідків потенційно небезпечних подій. Важливими учасниками є Український гідрометеорологічний центр, який забезпечує метеорологічні, гідрологічні та аерологічні спостереження; Державне агентство водних ресурсів, яке контролює якість поверхневих та підземних вод; Державна екологічна інспекція, що проводить аналітичні вимірювання та нагляд за дотриманням вимог природоохоронного законодавства; Держгеонадра, що здійснює контроль за станом надр і геологічних структур.

Об'єкти моніторингу довкілля охоплюють атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, лісові та польові екосистеми, стан флори і фауни, радіаційний фон, рівень хімічного, фізичного та біологічного забруднення. У великих містах

здійснюється моніторинг шумового навантаження, рівня вібрації, концентрації газоподібних і твердих частинок, у тому числі дрібнодисперсного пилу (PM_{2.5}, PM₁₀). На промислових територіях контролюється якість атмосферного повітря, стан промислових викидів, рівень забруднення ґрунтів важкими металами та органічними сполуками. Окремим компонентом є радіаційний моніторинг, який в Україні має особливе значення у зв'язку з Чорнобильською зоною відчуження, використанням радіаційних джерел у промисловості та ризиками військових дій.

Після 2022 року держава також здійснює спеціалізований моніторинг екологічних наслідків війни, що включає фіксацію забруднення вибуховими речовинами, зміни гідрологічного режиму внаслідок руйнування водних споруд, деградацію лісових масивів та прибережних територій, утворення техногенних небезпек через пошкодження промислових об'єктів [54]. Супутниковий моніторинг, аналіз даних дистанційного зондування Землі та застосування безпілотних літальних апаратів стали необхідною складовою оцінки впливу бойових дій на довкілля.

Збирання інформації здійснюється на основі стаціонарних постів спостереження, автоматизованих станцій, лабораторного аналізу проб, польових вимірювань, мобільних екологічних платформ і дистанційних методів. У ряді міст працюють автоматичні пости контролю якості повітря, які передають дані онлайн і забезпечують режим реального часу. Метеорологічні станції здійснюють вимірювання температури, вологості, тиску, швидкості вітру, опадів, що дозволяє коректно інтерпретувати динаміку забруднення. Водні пости контролю проводять регулярні гідрохімічні та гідробіологічні вимірювання, фіксуючи вміст шкідливих речовин, рівень насичення киснем та інші параметри.

Зібрані дані надходять до територіальних центрів збору та обробки інформації, де вони проходять первинну перевірку, верифікацію та статистичне опрацювання. На цьому етапі важливими є методи контролю якості даних, ідентифікація аномальних значень, зіставлення результатів із середніми багаторічними показниками та нормативними рівнями. Усі параметри порівнюються з гранично допустимими концентраціями забруднюючих речовин

або відповідними екологічними критеріями, що визначені державними стандартами та санітарними нормами.

Сучасні підходи до моніторингу передбачають широке використання геоінформаційних систем, автоматизованих аналітичних платформ і цифрових екологічних реєстрів. Дані, отримані з різних джерел, можуть інтегруватися у єдині інформаційні системи, що дає можливість формувати карти забруднення, моделювати розповсюдження хімічних або біологічних речовин, оцінювати зони впливу техногенних аварій. Такі технології використовуються як у повсякденному екологічному контролі, так і в умовах надзвичайних ситуацій, коли потрібне швидке моделювання можливих сценаріїв розвитку подій.

Важливою складовою роботи державної системи є аналіз просторово-часових тенденцій: визначення сезонних коливань, виявлення стійких джерел забруднення, оцінка ефективності природоохоронних заходів, прогнозування змін у разі природних або техногенних загроз. Після узагальнення інформації формуються офіційні щорічні національні, регіональні та тематичні аналітичні звіти, які подаються органам державної влади та використовуються у стратегічному плануванні.

Важливе значення має прозорість екологічної інформації. Законодавство зобов'язує державні органи забезпечувати відкритий доступ до екологічних даних, що відповідає вимогам Організації економічного співробітництва та розробників. Громадяни та громадські організації мають можливість отримувати інформацію про якість повітря, стан водних ресурсів, рівень радіації, екологічні інциденти та інші показники. Це сприяє підвищенню рівня екологічної свідомості населення та формує додатковий контроль за діяльністю підприємств і органів влади.

Попри значний обсяг роботи, система моніторингу стикається з низкою проблем. Частина технічного обладнання є застарілою, багато постів спостереження потребують модернізації, а лабораторії – оновлення аналітичних приладів. Деякі типи даних збираються з недостатньою частотою або фрагментарно. Бойові дії призвели до знищення окремих об'єктів моніторингу та ускладнили доступ до забруднених територій, що створює прогалини в еко-

аналітичному контролі. Потребує вдосконалення також інтеграція між відомствами та стандартизація обміну даними.

Перспективи розвитку полягають у створенні єдиного національного екологічного дата-центру, впровадженні автоматизованих мереж IoT-сенсорів, широкому використанні супутникових знімків високої роздільної здатності, застосуванні алгоритмів машинного навчання для прогнозування ризиків і моделювання сценаріїв надзвичайних ситуацій. Цифровізація усіх етапів моніторингу – від збору інформації до формування аналітичних висновків – відповідає сучасним підходам ЄС і є ключовим елементом екологічної безпеки держави [55].

Таким чином, державна система спостереження, збору, оброблення й аналізу інформації про стан довкілля відіграє фундаментальну роль у забезпеченні екологічного благополуччя населення та попередженні надзвичайних ситуацій. Її розвиток та модернізація є критично важливими в умовах техногенних і природних ризиків, кліматичних змін та наслідків війни. На основі систематично зібраних даних приймаються обґрунтовані управлінські рішення, плануються заходи з відновлення природних ресурсів і реалізується стратегія екологічної безпеки країни.

4.3 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у контексті використання інформаційної рекомендаційної системи. Основну увагу приділено аналізу умов праці користувачів і розробників цифрових систем, а також ролі державних інформаційних інфраструктур у забезпеченні екологічної безпеки та підтримці процесів реагування на надзвичайні ситуації.

Показано, що робота з рекомендаційною системою належить до інтелектуальних видів діяльності, пов'язаних із зоровим, когнітивним і психоемоційним навантаженням. Проаналізовано вплив тривалої роботи за комп'ютером, статичного положення тіла та оброблення значних обсягів

інформації, а також обґрунтовано необхідність урахування ергономічних, організаційних чинників. Окремо підкреслено значення належної організації робочого місця та зрозумілого, структурованого інтерфейсу для зниження когнітивного навантаження й підвищення ефективності взаємодії з системою.

У межах аналізу безпеки в надзвичайних ситуаціях висвітлено функціонування державної системи спостереження, збирання та аналізу інформації про стан довкілля, її нормативно-правові засади та роль у виявленні екологічних ризиків. Зазначено актуальність розвитку таких систем в умовах війни й кліматичних змін. Таким чином, розділ доповнює технічні аспекти дослідження обґрунтуванням безпечного та відповідального використання цифрових інструментів підтримки прийняття рішень у сфері міського озеленення та охорони довкілля.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі освітнього рівня «Магістр» розв’язано актуальну науково-практичну задачу розроблення інформаційної рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення з урахуванням екологічних, кліматичних та ґрунтових факторів. Запропонований підхід поєднує методи багатокритеріального аналізу з механізмами пояснюваності результатів, що забезпечує прозорість і обґрунтованість процесу прийняття рішень. У роботі сформовано теоретичну модель системи, реалізовано програмний прототип та експериментально підтверджено коректність його функціонування, що свідчить про практичну придатність розробки для використання в умовах післявоєнного відновлення міських територій.

У першому розділі кваліфікаційної роботи подано огляд сучасних підходів до міського озеленення та відновлення зелених зон у складних екологічних умовах, а також розглянуто роль цифрових і інформаційних систем у підтримці екологічно обґрунтованих управлінських рішень. Висвітлено проблематику вибору стійких рослин для міського середовища з урахуванням кліматичних і ґрунтових факторів, проаналізовано наукові джерела та існуючі рекомендаційні й аналітичні рішення у сфері екології. Обґрунтовано доцільність застосування багатокритеріальних методів оцінювання та поєднання формальних підходів із принципами пояснюваного штучного інтелекту, а також сформовано загальні вимоги до рекомендаційної системи вибору стійких рослин.

У другому розділі роботи описано теоретичну модель функціонування рекомендаційної системи на основі методології багатокритеріального аналізу (MCDA). Досліджено набір екологічних критеріїв, принципи їх нормалізації, зважування та агрегування, а також подано порівняльний аналіз методів багатокритеріального оцінювання. На цій основі обґрунтовано вибір методу зваженої лінійної агрегації як базового алгоритму формування інтегральної оцінки.

У третьому розділі розроблено архітектуру клієнт-серверної рекомендаційної системи вибору стійких рослин для міського озеленення.

Запропоновано структуру бази знань і алгоритмічний модуль оцінювання з використанням MCDA та пояснюваної логіки, спроектовано й реалізовано серверну частину, клієнтський інтерфейс і механізми взаємодії між компонентами системи. Проведено тестування програмного прототипу, що підтвердило коректність алгоритмів оцінювання, екологічної фільтрації та формування пояснень результатів.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» проаналізовано умови праці та фактори впливу при роботі з інформаційною рекомендаційною системою, а також описано вимоги до безпечних і комфортних умов праці користувачів. Окрему увагу приділено ролі державної системи моніторингу довкілля у забезпеченні екологічної безпеки та підтримці процесів реагування на надзвичайні ситуації, що доповнює технічні результати роботи контекстом відповідального та безпечного використання інформаційних технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Брошак І. С. Моніторинг ґрунтів, шляхи покращення родючості та екологічної безпеки земель Тернопільської області : монографія. – Тернопіль : Видавничо-поліграфічний центр «Економічна думка», 2013. – 160 с.
2. Економіка довкілля і природних ресурсів : монографія / Ю. В. Дзядикивич та ін. – Тернопіль, 2016. – 392 с.
3. Кунанець Н. Е., Небесний Р. М., Мацюк О. В. Особливості формування цілей соціальних та соціокомунікаційних складових у проєктах «Розумних міст» // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Інформаційні системи та мережі. – 2016. – Вип. 854. – С. 257–274. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2016_854_26.
4. Положення про державну систему моніторингу довкілля : Постанова Кабінету Міністрів України № 391 від 30.03.1998 (у ред. 2022 р.) // Офіційний вісник України. – 1998.
5. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>
(дата звернення: 14.12.2025).
6. Belton V., Stewart T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. – 372 p.
7. Dnipro Smart City. Urban Ecology and Green Infrastructure Report. – Dnipro : Dnipro City Council, 2023. – 52 p.
8. Duda O., Kochan V., Kunanets N., Matsiuk O., Pasichnyk V., Sachenko A., Pytlenko T. Data processing in IoT for smart city systems // Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – Metz, France, 18–21 September 2019. – Vol. 1. – P. 96–99.
9. Ecomisto Project. Environmental Monitoring Data Platform Overview. – Ecomisto, 2022. – 28 p.

10. EkoMonitor Kharkiv. Environmental Monitoring Technical Report. – Kharkiv : Kharkiv EcoLab, 2022. – 41 p.
11. El-Masri S., Khalil R. Post-Explosion Environmental Recovery in Beirut: Urban Green Spaces and Community Restoration // *Journal of Urban Ecology*. – 2020. – Vol. 6, No. 1. – juua021.
12. Environmental Modelling & Software. Multicriteria algorithms for ecological decision support // *Environmental Modelling & Software*. – 2024. – Vol. 170. – 106084.
13. European Commission. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. – Brussels : EU High-Level Expert Group on Artificial Intelligence, 2020. – 40 p.
14. FAO. Soil Compaction and Urban Construction Impacts on Soil Functions. – Rome : FAO, 2021. – 67 p.
15. FAO. Urban Forests: A Global Perspective. – Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. – 210 p.
16. Forestry Commission. The Urban Tree Manual. – London : Forestry Commission, 2022. – 120 p.
17. Goodwin N., Turner D., Alonso J. Geospatial AI for sustainable urban ecosystems // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 96. – 104663.
18. Green Kyiv. Catalogue of Urban Trees: Methodology and Data. – Kyiv : Kyiv City Administration, 2021. – 63 p.
19. Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., et al. A survey of methods for explaining black box models // *ACM Computing Surveys*. – 2021. – Vol. 54, No. 5. – P. 1–42.
20. INSPIRE Directive. Directive 2007/2/EC Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community // *Official Journal of the European Union*. – 2020. – Reprint.
21. Institute of Soil Science and Agrochemistry. War-Induced Soil Degradation in Ukraine: Field Report 2023–2024. – Kharkiv, 2024. – 61 p.
22. Korzun O., Petrenko V., Shevchenko L., Havryliuk M., Bondar O. War-induced soil degradation in Ukraine: Field evidence and spatial assessment // *Science*

of the Total Environment. – 2024. – Vol. 912. – 168744. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168744>.

23. Kravchenko T., Melnyk O., Havrylenko I. Community engagement in post-war green restoration // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 14. – 11205. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su151411205>.

24. Kumar P., Khare M., Harrison R. Air pollution exposure in urban environments during and after conflicts // Environmental Pollution. – 2021. – Vol. 285. – 117130.

25. Lacan I., McBride J. War and Trees: The Impact of Armed Conflict on Urban Forests // Urban Ecosystems. – 2009. – Vol. 12, No. 3. – P. 251–264.

26. Lehtonen A., Saarinen M., Koski T. Decision-Tree-Based Urban Plant Planner for Nordic Cities // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 12. – 9451.

27. Lehtonen M., Ranta M., Korpela K. Machine-learning-based planning tools for cold-climate cities (Green Planner) // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – 812.

28. Li D., Bou-Zeid E. Urban heat mitigation through vegetation // Nature Reviews Earth & Environment. – 2023. – Vol. 4. – P. 125–140.

29. López B., et al. Machine learning models for predicting urban tree survival // Ecological Informatics. – 2023. – Vol. 78. – 102336.

30. Lviv Open Data Portal. Urban Greenery Inventory Dataset. – Lviv : Lviv City Council, 2022.

31. Makdisi A., Chidiac S., Fawaz M. Urban environmental recovery after the Beirut Port explosion: Early assessments // Environmental Research Letters. – 2021. – Vol. 16, No. 12. – 124021. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3c81>.

32. Müller N., Werner P., Kelcey J. (eds.). Urban Biodiversity and Ecosystem Services. – Cham : Springer, 2020. – 600 p.

33. Nature Climate Change. Urban vegetation and cooling: A meta-analysis of global evidence // Nature Climate Change. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – P. 355–368.

34. Nowak D. J., Hoehn R., Bodine A., Greenfield E. Accuracy of biomass and ecosystem service estimation using i-Tree // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 320. – 121291.

35. OECD. Artificial Intelligence in Society. – Paris : OECD Publishing, 2021.
36. Open Data Institute Europe. Assessment of municipal green data platforms in Eastern Europe. – London : ODI Europe, 2023. – 54 p.
37. PlantSelect Estonia. Machine Learning-Based Plant Suitability Classification: Technical Whitepaper. – Tallinn : PlantSelect, 2023. – 33 p.
38. Pritchard J., Taylor S., Ferrini F. Urban plant stress tolerance mechanisms: A review // Urban Forestry & Urban Greening. – 2022. – Vol. 74. – 127632.
39. Saaroni H., Ziv B., Nevo R. Machine learning integration in urban green infrastructure planning // Landscape and Urban Planning. – 2022. – Vol. 226. – 104503.
40. Sahoo S. K., Goswami S. S. A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods // Decision Making Advances. – 2023. – Vol. 1, No. 1. – P. 25–48.
41. San Francisco Urban Forest Map. Technical Documentation. – San Francisco : City of San Francisco, 2021. – 47 p.
42. Scientific Reports. AI for Urban Vegetation Management // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article 2251.
43. Shimada G., Johnston M. Planting “Post-Conflict” Landscapes: Urban Trees in Peacebuilding and Reconstruction // Landscape Research. – 2020. – Vol. 45, No. 7. – P. 869–885.
44. TreeTalk London. Platform Documentation and Data Specification. – London : TreeTalk Foundation, 2023. – 39 p.
45. Ukrainian Ecological Research Network. Social Resilience and Urban Greening Participation after Conflict: Survey Report 2023. – Kyiv, 2023. – 54 p.
46. Ukrainian Hydrometeorological Institute. Environmental Impact of the Kakhovka Dam Destruction: Hydrology, Sediments, and Heavy Metals. – Kyiv : UHI, 2023. – 78 p.
47. UNECE; UNEP. Environmental Damage Assessment and Post-Conflict Urban Recovery Guidance. – Geneva : United Nations, 2023. – 142 p.
48. UNEP. Environmental impacts of the war in Ukraine: Preliminary assessment. – Nairobi : UNEP, 2022. – 112 p.

49. United Nations. Sustainable Development Goals. Goal 11: Sustainable Cities and Communities. – New York : United Nations, 2015.
50. United Nations Environment Programme. Environmental Impacts of Conflicts: Global Update 2023. – Nairobi : UNEP, 2023. – 56 p.
51. Urban Climate. Cooling performance of urban vegetation under heat stress // Urban Climate. – 2024. – Vol. 54. – 101123.
52. Urban Forestry & Urban Greening. Effectiveness of AI-based recommendation systems in municipal greening // Urban Forestry & Urban Greening. – 2023. – Vol. 84. – 127215.
53. USDA Forest Service. i-Tree Eco Manual. – Washington, D.C. : USDA, 2022. – 182 p.
54. Wieclaw L., Pasichnyk V., Kunanets N., Duda O., Matsiuk O., Falat P. Cloud computing technologies in “smart city” projects // Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – Bucharest, Romania, 21–23 September 2017. – P. 339–342.
55. World Economic Forum; MIT Senseable Lab. Global review of AI-enabled urban greening platforms. – Geneva : World Economic Forum, 2022. – 48 p.

ДОДАТКИ

Тези з конференції

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів**

11-12 грудня 2025 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

10.	Ю. П. Волинєць БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ	239
11.	Р.І. Гануля, Т.Є. Хованєць, І.Р. Козбур, Ю.О. Тимошенко АВТОМАТИЗАЦІЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА ПК ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМ TINUTASK ТА AUTONOTKEY	241
12.	А.В. Головка, проф., д.е.н. Матійчук Л.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА В УМОВАХ ВІЙНИ	243
13.	К.Г. Голубко, Я.В. Литвиненко РОЗРОБКА ДЕСКТОПНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДЕТЕКЦІЇ МІМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	244
14.	О. Ю. Горішний, В.Д. Тимошук ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЛОЩИНИ ДАНИХ ВІРТУАЛЬНОГО КОМУТАТОРА OPEN VSWITCH	246
15.	В.А. Готович, В.А. Курян ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ РУХІВ ЛЮДИНИ ЗА КООРДИНАТАМИ MEDIAPIPE POSE	247
16.	А.І. Дацко ТИПИ ТЕСТУВАННЯ ЗНАННЯ КОДУ	250
17.	І.Ю. Дедів, О.П. Казьмірук ПРИВАТНІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ 5G ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ	252
18.	Н.Демчан, Р. Жаровський МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНО АПАРАТНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЗА ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН З ВРАХУВАННЯМ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЇ	254
19.	В.Л. Дерягін, М.В. Дрогобицький, Н.С. Луцик ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАФІКУ МІЖ МІКРОСЕРВІСАМИ В ISTIO SERVICE MESH	255
20.	Л. П. Дмитроца, О. І. Шубалій ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТРЕНДІВ АНАЛІТИКИ BIG DATA	257
21.	М.В. Дрогобицький, А.І. Фіялка, Н.С. Луцик КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖ MICROGRID	259
22.	В. Л. Дунєць, А. В. Хиль ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ІНЕРЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ КАЛМАНА	261
23.	В. Л. Дунєць, Н. А. Гульовський ЦИФРОВА РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	263
24.	П. Загалюк РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА У ВІЙНІ	264
25.	О.М. Задворний; І.В. Бойко ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕТЕКЦІЇ ЕПІЛЕПТИЧНИХ НАПАДІВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ ТОПОЛОГІЧНО-СПЕКТРАЛЬНИХ ОЗНАК	266
26.	Р.Р.Золотий, М.С. Дзюмак, Д.В. Сас, І.Я. Харів ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	268

УДК 519.816, 911.375

А.В. Головка, проф., д.е.н. Матійчук Л.П.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИБОРУ СТІЙКИХ
РОСЛИН ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА В УМОВАХ ВІЙНИ**

A.V. Holovko, Prof., Dr. Matiichuk L.P.

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL
INTELLIGENCE-BASED RECOMMENDATION SYSTEM FOR
SELECTING RESILIENT PLANTS FOR URBAN GREENING UNDER
WAR CONDITIONS**

Міські інформаційні системи відновлення територій потребують цифрових рішень, що дозволяють автоматизувати аналіз екосистемних параметрів і підтримати прийняття рішень у складних умовах післявоєнної реконструкції. Одним із критичних завдань є побудова алгоритмічних моделей, здатних опрацьовувати різноманітні екологічні дані та формувати стійкі рекомендації щодо біотехнічних рішень для міського середовища. З огляду на це виникає потреба у створенні інтелектуальної програмної системи, що поєднує методи багатокритеріального аналізу з механізмами пояснюваного штучного інтелекту.

Метою роботи є створення та дослідження AI-підтримуваної інформаційно-аналітичної системи вибору стійких рослин для міського озеленення, побудованої на основі методології Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) та rule-based explainability. Система забезпечує формування прозорих рекомендацій шляхом алгоритмізації процесу оцінювання параметрів середовища та властивостей рослин.

У роботі реалізовано багаторівневу алгоритмічну схему, що включає:

1. модуль обмежувальних фільтрів (морозостійкість, тип ґрунту, світлові умови);
2. модуль нормалізації числових та категорійних параметрів;
3. MCDA-модель зваженої лінійної агрегації.

Інтегральна оцінка виду обчислюється за формулою:

$$\text{Score}(a) = \sum (w_i * si(a)) \quad (1)$$

де w_i — вагові коефіцієнти критеріїв, а $si(a)$ — нормалізовані субскори для альтернативи a . Формалізація дозволяє однозначно відтворювати результати, забезпечує стабільність алгоритму та придатність для масштабування.

Для оцінювання роботи системи проведено програмні експерименти через API-ендпоінт рекомендацій, у межах яких протестовано три типові сценарії використання:

холодний регіон із піщаними ґрунтами, посушливі території з родючими чорноземами та урбанізовані/порушені локації після руйнувань. У всіх випадках система коректно виконала фільтрацію непридатних альтернатив та сформувала ранжовані множини результатів, що підтверджує узгодженість MCDA-моделі та відтворюваність обчислень. Контрольний сценарій нульової відповідності засвідчив правильну роботу обмежувальних фільтрів, оскільки жодного виду рекомендовано не було.

Висновок. Досліджено алгоритмічну модель рекомендаційної системи та встановлено її коректну роботу в умовах змінних параметрів середовища. Отримані результати підтверджують, що застосування MCDA, rule-based explainability та системи обмежувальних фільтрів забезпечує надійну інформаційну підтримку для задач цифрового планування озеленення й може бути інтегроване в більш широкі урбаністичні та GIS-платформи.

Література

1. AI for Urban Vegetation Management. 2024. Scientific Reports. Vol. 14, Article 2251. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-2251>
2. Environmental Modelling & Software. Multicriteria algorithms for ecological decision support. 2024. Environmental Modelling & Software. Vol. 170, Article 106084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.106084>
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Urban Forests: A Global Perspective. FAO, Rome, 2023. 210 p.
4. Forestry Commission. The Urban Tree Manual. 2nd ed. UK Forestry Commission, London, 2022. 120 p.
5. Effectiveness of AI-based recommendation systems in municipal greening. 2023. Urban Forestry & Urban Greening. Vol. 84, Article 127215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127215>
6. Shimada G., Johnston M. 2015. Planting 'Post-Conflict' Landscapes: Urban Trees in Peacebuilding and Reconstruction. Urban Forestry & Urban Greening. Vol. 14(4), 1000–1010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.012>
7. United Nations Environment Programme. Environmental Consequences of the War in Ukraine. UNEP Report, 2022. 78 p.
8. Urban trees and cooling effects: Meta-analysis. 2023. Nature Climate Change. Vol. 13(4), 350–362. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01612-1>

Тези з конференції

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

FUNCTIONALITY AND DEVELOPMENT PROSPECTS

В. Бурса, І. Мудрик

ПЕРСПЕКТИВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОПОВІЩЕННЯ ПРО ВРАЗЛИВОСТІ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ NVD ТА ІДЕНТИФІКАТОРІВ CPE

V. Bursa, I. Mudryk

PROSPECTS OF AUTOMATED VULNERABILITY ALERTING FOR SOFTWARE PRODUCTS BASED ON NVD DATA AND CPE IDENTIFIERS 28

Д. Вихованець, М. Стадник

ВИЯВЛЕННЯ ФІШІНГОВИХ ПОВІДОМЛЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ LLM

D. Vykhovanets, M. Stadnyk

DETECTION OF PHISHING MESSAGES USING LLMS 29

Н. Вівчарівський, Т. Лечаченко

МЕХАНІЗМ БЕЗПЕЧНОГО ОНОВЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КРИПТОГРАФІЇ

N. Vivcharivskyi, T. Lechachenko

SECURE CONTAINER UPDATE MECHANISM USING CRYPTOGRAPHY 30

О. Вінніченко

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАБІЛЬНОСТІ WORDPRESS-ПЛАГІНІВ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

O. Vinnichenko

AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE STABILITY OF WORDPRESS PLUGINS IN DYNAMIC ENVIRONMENTS 31

І. Воробець

ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗШИРЕННЯ ВИБІРКИ АУДІОДАНИХ ЗА УМОВ ДЕФІЦИТУ ВИХІДНИХ АУДІОЗАПИСІВ

I. Vorobets

REVIEW OF METHODS FOR EXPANDING AUDIO DATASETS UNDER LIMITED AVAILABILITY OF ORIGINAL AUDIO RECORDINGS 33

І. Врублевич

МОДЕЛЬ PROOF OF REPUTATION, СФЕРИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

I. Vrublevych

PROOF OF REPUTATION MODEL, AREAS OF ITS APPLICATION 34

Р. Глов'як, Л. Матійчук

АЛГОРИТМІЧНІ ПІДХОДИ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ ДОСТАВКИ У SMART LOGISTICS

R. Glowiak, L. Matiichuk

ALGORITHMIC APPROACHES TO DELIVERY TIME FORECASTING IN SMART LOGISTICS 35

Л. Гнатківський, А. Турчманович, Н. Загородна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ

L. Hnatkivskyi, A. Turchmanovych, N. Zagorodna

RESEARCH OF APPROACHES TO IMPROVE EFFICIENCY OF INTRUSION DETECTION SYSTEMS 37

А. Головка, Л. Матійчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА В УМОВАХ ВІЙНИ

A. Holovko, L. Matiichuk

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED RECOMMENDATION SYSTEM FOR SELECTING RESILIENT PLANTS FOR 38

УДК 004.8, 519.816, 911.375

А. Головка; Л. Матійчук, д. с. н., проф.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИБОРУ СТІЙКИХ РОСЛИН ДЛЯ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА В УМОВАХ ВІЙНИ

UDC 004.8, 519.816, 911.375

A. Holovko; L. Matiichuk, Dr., Prof.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED RECOMMENDATION SYSTEM FOR SELECTING RESILIENT PLANTS FOR URBAN GREENING UNDER WAR CONDITIONS

Міські інформаційні системи відновлення територій потребують інструментів, здатних автоматизувати аналіз екосистемних параметрів і забезпечувати підтримку прийняття

рішень у складних умовах післявоєнної реконструкції. Одним із ключових завдань є побудова математичних і програмних моделей, що можуть обробляти різноманітні екологічні та технічні дані, формувати пояснювані рекомендації та працювати в інтегрованих цифрових середовищах. Це зумовлює потребу у створенні інтелектуальної інформаційної системи,

яка поєднує багатокритеріальний аналіз, модульні алгоритмічні фільтри та механізми explainable AI.

Метою роботи є створення та дослідження ШІ-підтримуваної інформаційно-аналітичної системи вибору стійких рослин для міського озеленення, побудованої на основі методів Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) у поєднанні з rule-based explainability. Система забезпечує прозоре формування рекомендацій через алгоритмізацію процесу оцінювання параметрів середовища, властивостей рослин та їхньої взаємної відповідності.

У роботі реалізовано багаторівневу алгоритмічну схему, яка включає:

- модуль обмежувальних фільтрів (морозостійкість, тип ґрунту, освітленість);
- модуль нормалізації числових і категорійних параметрів;
- MCDA-модель зваженої лінійної агрегації;
- модуль пояснення (XAI) на основі rule-based інтерпретацій.

Інтегральна оцінка альтернативи обчислюється за формулою:

$$\text{Score}(a) = \sum (w_i * si(a)) \quad (1)$$

де w_i – вагові коефіцієнти критеріїв, а $si(a)$ – нормалізовані субскори для альтернативи a . Модель забезпечує формальну відтворюваність результатів, стійкість до варіацій вхідних параметрів та придатність до масштабування в розподілених інформаційних системах.

Програмна реалізація побудована як REST API на основі FastAPI (Python 3.14). База знань містить понад тисячу видів рослин, що імпортовані з JSON-файлів і структуровані у SQLite-схемі (13 атрибутів для кожної рослини). Основний ендпоінт POST /recommend формує ранжований список альтернатив та генерує пояснення на основі XAI-модуля. Модульна архітектура (фільтри, нормалізація, MCDA-ядро, XAI-компонент) забезпечує масштабованість і можливість інтеграції з екологічними та GIS-системами.

Для оцінювання роботи системи проведено програмні експерименти через API, у межах яких протестовано три типові сценарії: холодний регіон із піщаними ґрунтами; посушливі території з родючими чорноземами; порушені міські ґрунти після руйнувань. У всіх випадках система коректно виконала rule-based фільтрацію, побудувала ранжовані множини результатів і забезпечила стабільність MCDA-оцінок. Контрольний сценарій нульової відповідності підтвердив коректну роботу обмежувальних фільтрів – жоден вид не був рекомендований.

Висновок. Досліджено алгоритмічну модель рекомендаційної системи та підтверджено коректність її роботи в умовах змінних параметрів середовища. Отримані результати демонструють, що поєднання MCDA, rule-based explainability та модульних обмежувальних фільтрів забезпечує надійну інформаційну підтримку задач цифрового планування озеленення й може бути інтегроване в урбаністичні, екологічні та GIS-платформи.

Література

1. AI for Urban Vegetation Management. 2024. Scientific Reports. Vol. 14, Article 2251. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-2251>
2. Effectiveness of AI-based recommendation systems in municipal greening. 2023. Urban Forestry & Urban Greening. Vol. 84, Article 127215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127215>
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Urban Forests: A Global Perspective. FAO, Rome, 2023. 210 p.
4. Forestry Commission. The Urban Tree Manual. 2nd ed. UK Forestry Commission, London, 2022. 120 p.
5. Multicriteria algorithms for ecological decision support. 2024. Environmental Modelling & Software. Vol. 170, Article 106084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.106084>
6. Shimada G., Johnston M. 2015. Planting 'Post-Conflict' Landscapes: Urban Trees in Peacebuilding and Reconstruction. Urban Forestry & Urban Greening. Vol. 14(4), 1000–1010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.012>
7. United Nations Environment Programme. Environmental Consequences of the War in Ukraine. UNEP Report, 2022. 78 p.
8. Urban trees and cooling effects: Meta-analysis. 2023. Nature Climate Change. Vol. 13(4), 350–362. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01612-1>

Схема обробки потоку даних

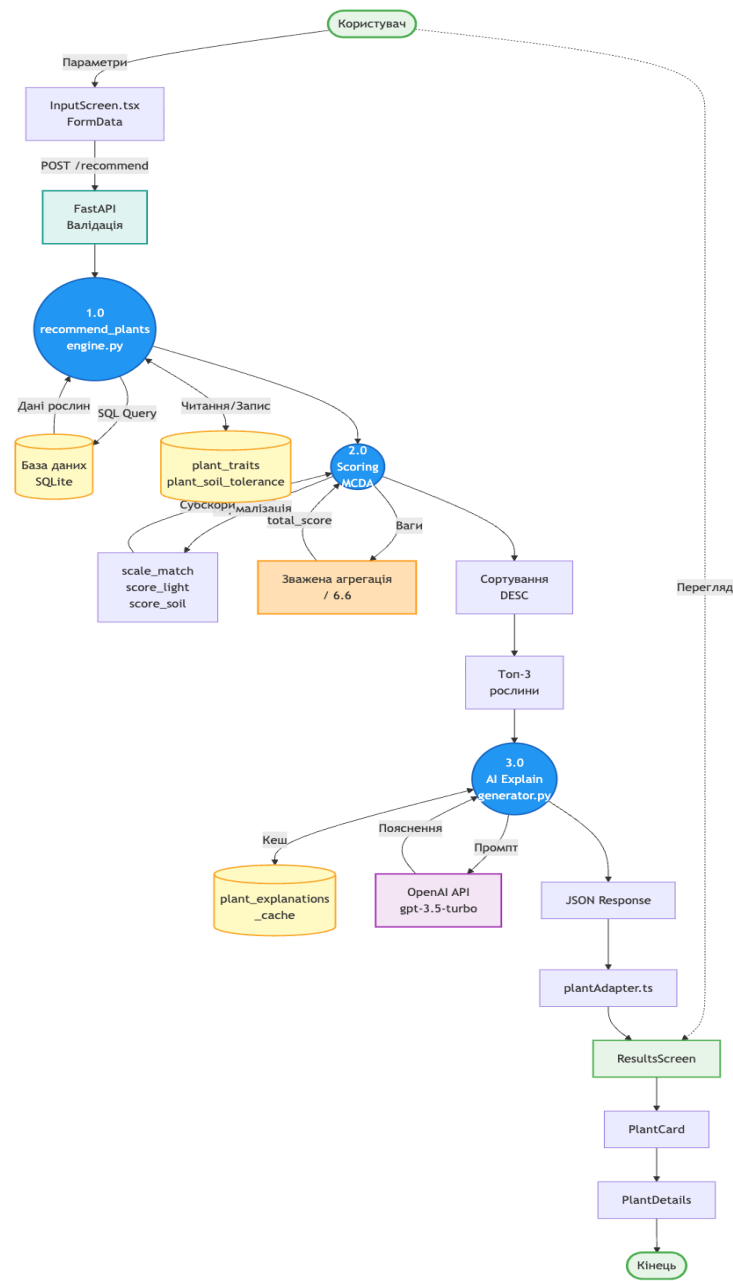


Рисунок В.1 – Схема обробки потоку даних