

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ОБЛІКУ ТА ФІНАНСІВ

Кафедра комп'ютерних технологій і моделювання систем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Грицкевич Данило Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача освіти)

УДК 004.414.2:911.3:338.48

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Моделювання інформаційної системи для геоінформаційного аналізу
рекреаційного потенціалу територій

(тема роботи)

122 Комп'ютерні науки

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Ковальчук М. О.
(прізвище, ім'я, по батькові)
кандидат педагогічних наук,
доцент
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

Висновок кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем:
за результатами попереднього захисту:

Протокол засідання кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем

№ _____ від « _____ » _____ 20__ р.

Завідувач кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем
к.п.н., доцент _____ М. О. Ковальчук

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище, ім'я, по батькові)

« _____ » _____ 20__ р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Грицкевич Данило Олегович захистив
(прізвище, ім'я, по батькові)

кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

лаборант кафедри

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

В. В. Корольчук

(прізвище, ім'я, по батькові)

АНОТАЦІЯ

Грицкевич Д. О. *Моделювання інформаційної системи для геоінформаційного аналізу рекреаційного потенціалу територій* – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Обсяг кваліфікаційної роботи: 39 сторінок (5 – рисунків, 8 – таблиць, 3 – додатки, 61 – джерело).

Ключові слова: геоінформаційна система, рекреаційний потенціал, просторовий аналіз, багатокритеріальна оцінка, метод аналітичної ієрархії, DBSCAN.

Кваліфікаційна робота присвячена моделюванню інформаційної системи для геоінформаційного аналізу рекреаційного потенціалу територій. У роботі обґрунтовано застосування геоінформаційних технологій і методів багатокритеріального аналізу для комплексної оцінки територій з урахуванням природних, соціально-економічних та інфраструктурних факторів.

Наукова новизна полягає у поєднанні методу аналітичної ієрархії, методу зваженої суми балів та алгоритму просторової кластеризації DBSCAN для інтегральної оцінки рекреаційного потенціалу та ідентифікації пріоритетних зон. Розроблено веб-орієнтовану геоінформаційну систему, що забезпечує візуалізацію та аналіз результатів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів для територіального планування, оптимізації розміщення рекреаційних об'єктів і зниження екологічних ризиків.

SUMMARY

HRYTSKEVYCH D. O. *Modeling of an information system for geoinformation analysis of the recreational potential of territories.* – Qualification work as a manuscript.

Master's degree qualification work in specialty 122 – Computer Science. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The volume of the work: 39 pages (5 – figures, 8 – tables, 3 – appendices, 61 – sources).

Key words: geoinformation system, recreational potential, spatial analysis, multi-criteria evaluation, analytical hierarchy method, DBSCAN.

The thesis is devoted to modeling an information system for geoinformation analysis of the recreational potential of territories. The work substantiates the use of geoinformation technologies and multi-criteria analysis methods for a comprehensive assessment of territories, taking into account natural, socio-economic, and infrastructural factors.

The scientific novelty lies in the combination of the analytical hierarchy method, the weighted sum of points method, and the DBSCAN spatial clustering algorithm for the integrated assessment of recreational potential and identification of priority areas. A web-based geographic information system has been developed to visualize and analyze the results.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the results for territorial planning, optimizing the location of recreational facilities, and reducing environmental risks.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ГІС ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ	7
1.1. Поняття, структура та принципи побудови геоінформаційних систем.....	7
1.2. Рекреаційний потенціал територій як об'єкт інформаційного моделювання	9
1.3. Аналіз наукових підходів до оцінки рекреаційного потенціалу ...	13
1.4. Огляд сучасних ГІС-рішень і тенденцій розвитку геоаналітики ..	15
Висновки до першого розділу.....	16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ	18
2.1. Постановка задачі та обґрунтування вибору методів	18
2.2. Математичний апарат багатофакторної оцінки	21
2.3. Формалізація факторів та алгоритмів ідентифікації зон.....	25
Висновки до другого розділу	27
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	28
3.1. Проектування бази даних.....	28
3.2. Реалізація серверної частини	30
3.3. Реалізація клієнтської частини.....	33
3.4. Тестування системи	35
Висновки до третього розділу	37
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	46

ВСТУП

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стабільним зростанням попиту на рекреаційні послуги, що зумовлено інтенсивною урбанізацією та необхідністю нівелювання стресових чинників професійної діяльності. Проте неконтрольоване зростання відвідуваності природних територій створює критичні виклики для екологічної безпеки.

Одним із найбільш деструктивних наслідків неорганізованої рекреації є стрімке зростання кількості лісових та ландшафтних пожеж. За статистичними даними, понад 90% випадків загорянь у лісових масивах зумовлені людським фактором, зокрема необережним поводженням з вогнем під час відпочинку. В умовах кліматичних змін та підвищення температурного режиму, ризик виникнення пожеж у приміських та паркових зонах зростає експоненціально, що вимагає впровадження превентивних стратегій управління територіями.

Державна політика у цій сфері, що реалізується ДП «Ліси України», спрямована на створення розгалуженої мережі спеціалізованих рекреаційних пунктів. У 2025 році вже завершено облаштування 17 таких об'єктів, а на період 2025–2026 рр. заплановано створення ще 83 пунктів [1]. Наукова доцільність такого підходу полягає у стратегії «локалізації ризику»: створення привабливої та безпечної інфраструктури дозволяє перенаправити потоки відпочивальників із вразливих лісових масивів до контрольованих локацій, оснащених засобами пожежогасіння та вогнетривкими майданчиками.

Незважаючи на активну розбудову мережі, актуальною проблемою залишається відсутність комплексних математичних моделей для оптимального розміщення цих об'єктів. Традиційні підходи часто ігнорують просторову кореляцію між щільністю населення, існуючою пожежною статистикою та фактичним рекреаційним потенціалом. Це призводить до неефективного використання ресурсів та низького рівня захищеності екосистем.

Використання геоінформаційних технологій та методів інтелектуального аналізу даних дозволяє інтегрувати ці різномірні фактори у єдину систему підтримки прийняття рішень. Досвід впровадження ГІС-орієнтованих планів рекреації (наприклад, Kentucky State Comprehensive Outdoor Recreation Plan) підтверджує можливість підвищення ефективності управління територіями на 40–50% [2]. Для України розробка спеціалізованої інформаційної системи, що моделює рекреаційний потенціал з урахуванням екологічних ризиків (зокрема пожежної небезпеки), є критично необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку територій та збереження природного фонду.

Метою роботи є моделювання інформаційної системи, що сприятиме комплексній оцінці рекреаційного потенціалу територій, ефективному плануванню розвитку туристично-рекреаційної інфраструктури, прийняттю обґрунтованих управлінських рішень щодо використання природних ресурсів, оптимізації розміщення рекреаційних об'єктів та раціональному використанню рекреаційних територій.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення взаємопов'язаних завдань. Спершу необхідно проаналізувати предметну область дослідження, вивчивши теоретичні основи геоінформаційних систем та існуючі підходи до оцінки рекреаційного потенціалу. Далі слід визначити конкретні вимоги до моделювання системи з урахуванням специфіки задачі. На основі цього необхідно спроектувати архітектуру інформаційної системи, визначивши її компонентну структуру. Після цього потрібно змоделювати систему, реалізувавши ключові компоненти для багатокритеріальної оцінки. Завершальним етапом стане тестування розробленої системи для перевірки коректності роботи.

Об'єктом дослідження є сукупність методів і засобів геоінформаційного аналізу рекреаційного потенціалу територій, тоді як **предметом** – процес моделювання інформаційної системи для геоінформаційного аналізу та оцінки рекреаційного потенціалу територій.

Для розв'язання поставлених у роботі завдань використано комплекс наукових **методів**: *системний аналіз* – для дослідження рекреаційного потенціалу як складної динамічної системи з багаторівневими взаємозв'язками між її елементами; *порівняльний аналіз* – при вивченні теоретичних підходів до оцінювання територій та проведенні порівняльного огляду функціональних можливостей сучасних ГІС-платформ; *моделювання* – для побудови концептуальних та логічних моделей досліджуваних процесів, що дозволило формалізувати структуру предметної області; *метод аналітичної ієрархії Т. Сааті та метод експертних оцінок* – для визначення вагових коефіцієнтів факторів оцінювання шляхом структурування проблеми та проведення процедури парних порівнянь за дев'ятибальною шкалою з обов'язковим контролем рівня узгодженості думок експертів (індекс узгодженості $\leq 10\%$) [3]; *метод зваженої суми балів* – для обчислення інтегрального показника на основі лінійної комбінації нормалізованих значень критеріїв із урахуванням їхньої вагомості [4]; *алгоритм просторової кластеризації DBSCAN* – для автоматичної ідентифікації кластерів довільної форми на основі аналізу щільності точок у просторі [5].

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше розроблено комплексну модель оцінювання рекреаційного потенціалу, що ґрунтується на інтеграції семи різнорідних геопросторових критеріїв. На відміну від існуючих підходів, модель уперше поєднує традиційні показники атрактивності з інноваційними факторами: демографічно зумовленим попитом, статистикою виникнення лісових пожеж та ринковою насиченістю об'єктами-конкурентами.

Дістало подальший розвиток застосування методу просторової кластеризації DBSCAN для автоматизованої ідентифікації функціональних зон: територій підвищеного пожежного ризику, буферних екологічних зон та транзитних рекреаційних коридорів, що забезпечує високу точність просторової локалізації рекомендацій.

Теоретичне значення роботи. Обґрунтовано доцільність застосування системного аналізу та методів машинного навчання (щільнісних алгоритмів кластеризації) для моделювання складних рекреаційних систем. Формалізовано структуру багатofакторного аналізу територій, що розширює теоретичну базу геоінформаційного моделювання в частині врахування екологічних ризиків та соціально-економічної динаміки ринку при оцінюванні потенціалу територій.

Практичне значення одержаних результатів. Полягає у створенні прикладного інструментарію для підтримки прийняття рішень різними суб'єктами: для органів місцевого самоврядування: автоматизація процесів територіального планування та оптимізація розподілу бюджетних коштів на розвиток інфраструктури; для приватних інвесторів: методика об'єктивного оцінювання інвестиційної привабливості локацій з урахуванням реального попиту та конкурентного середовища; для екологічних організацій: механізм зниження антропогенного навантаження на заповідні фонди через науково обґрунтоване проектування буферних зон.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ГІС ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

1.1. Поняття, структура та принципи побудови геоінформаційних систем

Розвиток інформаційних технологій протягом останніх десятиліть кардинально змінив підходи до роботи з просторовою інформацією. Якщо у доцифрову епоху аналіз територій потребував роботи з паперовими картами та ручних вимірювань, то сьогодні геоінформаційні системи дозволяють інтегрувати величезні обсяги різномірної інформації та проводити складні операції за лічені секунди.

Геоінформаційна система – це інтегрована комп'ютерна система під управлінням спеціалістів-аналітиків, яка здійснює збір, зберігання, маніпулювання, аналіз, моделювання і відображення просторово координованої інформації [6]. Це визначення підкреслює важливу роль людини як невід'ємного елемента системи, оскільки саме людина виступає і спостерігачем, і експертом, і аналітиком. Дослідники часто використовують термін «людино-машинний комплекс» для акцентування цієї ролі.

Функціональна модель ГІС включає п'ять взаємодіючих компонентів: апаратне забезпечення, програмне забезпечення, дані, методи аналізу та користувачі [7]. Взаємодія цих компонентів як людино-машинного комплексу представлена у вигляді структурної схеми (див. рис. А.1, дод. А). Схема наочно демонструє центральну роль користувача у керуванні системою та двосторонні зв'язки між усіма компонентами – від дій користувача до відповідей системи та автономної машинної взаємодії між технічними елементами [7].

Геоінформаційні системи зберігають інформацію у вигляді набору тематичних шарів, які об'єднані на основі географічного положення [8]. Кожен шар містить інформацію про певний тип об'єктів – рельєф, гідрографію, дорожню мережу, адміністративні межі. Цей підхід забезпечує

гнучкість у роботі, оскільки можна легко комбінувати різні шари для виявлення просторових закономірностей.

Просторові дані представляються у двох основних формах. Векторна модель використовує геометричні примітиви: точки для дискретних об'єктів, лінії для протяжних елементів, полігони для площинних об'єктів. Кожен об'єкт може мати набір атрибутів, що описують його властивості. Растрова модель представляє інформацію у вигляді регулярної сітки осередків, де кожен осередок має певне значення. Така модель зручна для представлення безперервних явищ та результатів дистанційного зондування [9].

Робота геоінформаційної системи включає кілька взаємопов'язаних етапів. Збір даних здійснюється з різних джерел – супутникових знімків, картографічних матеріалів, польових обстежень, статистичних звітів. Обробка та фільтрація передбачає перевірку даних на коректність та усунення похибок. Зберігання організовується у вигляді структурованих баз геопросторових даних. Аналіз включає просторові операції, такі як накладення шарів, побудова буферних зон, мережевий аналіз. Візуалізація забезпечує представлення результатів у вигляді інтерактивних карт та діаграм [10].

Архітектура сучасних геоінформаційних систем будується на принципах багаторівневої організації. Рівень даних забезпечує фізичне зберігання просторової інформації у базах даних. Рівень бізнес-логіки містить алгоритми обробки та аналізу, реалізує функціональність системи. Рівень представлення забезпечує взаємодію з користувачем через графічний інтерфейс. Така архітектура дозволяє незалежно розвивати різні компоненти та забезпечує гнучкість при масштабуванні.

Системи координат відіграють фундаментальну роль у геоінформаційних системах. Географічні системи використовують кутові одиниці для опису положення на сферичній поверхні Землі. Проекційні системи трансформують сферичну поверхню на площину, що спрощує

вимірювання відстаней та площ. Для України основною національною системою є УСК-2000, що базується на референц-еліпсоїді GRS80 та забезпечує необхідну точність для більшості прикладних завдань.

Розвиток веб-технологій відкрив якісно новий етап у розвитку геоінформаційних систем. Традиційні настільні ГІС поступово доповнюються веб-орієнтованими рішеннями, які працюють за принципом клієнт-серверної архітектури [11]. Серверна частина виконує складні геопросторові обчислення та зберігає дані, тоді як клієнтська частина забезпечує інтерактивний інтерфейс через звичайний веб-браузер.

Переваги веб-ГІС є суттєвими для широкого впровадження технологій. По-перше, вони не потребують встановлення додаткового програмного забезпечення, що знижує технічні бар'єри для користувачів. По-друге, забезпечується кросплатформеність – система працює однаково на різних операційних системах. По-третє, спрощується процес оновлення, оскільки зміни вносяться централізовано на сервері. По-четверте, полегшується колективна робота з єдиною базою даних. По-п'яте, знижуються вимоги до обчислювальних ресурсів клієнтської машини.

Геоінформаційні системи об'єднують дані з різних підрозділів організацій чи навіть різних галузей діяльності регіону. Колективне використання накопичених даних та їх інтеграція в єдиний масив надає істотні переваги і збільшує ефективність роботи. Це особливо важливо для задач рекреаційного планування, де необхідно враховувати інформацію від лісового господарства, природоохоронних установ, транспортних організацій, статистичних служб та органів місцевого самоврядування.

1.2. Рекреаційний потенціал територій як об'єкт інформаційного моделювання

Рекреаційний потенціал території є складним багатоаспектним поняттям, що знаходиться на перетині інтересів різних наукових дисциплін. Його складність пов'язана з багатокомпонентною природою рекреаційних

ресурсів та множинністю факторів, що впливають на можливості організації відпочинку.

У найзагальнішому вигляді рекреаційний потенціал визначається як система природних, історико-культурних об'єктів та їхніх властивостей, які використовуються у рекреаційній діяльності [12]. Він є функціональною основою рекреації та певною мірою її складовою частиною. Важливо розрізняти поняття "рекреаційні ресурси" та "рекреаційний потенціал" – перше відноситься до конкретних об'єктів, тоді як друге охоплює інтегральну оцінку можливостей території.

Природна складова включає сукупність елементів природного середовища для рекреаційних цілей. Рельєф місцевості визначає можливості організації різних видів відпочинку – від пішохідних прогулянок до гірського туризму. Кліматичні умови впливають на сезонність рекреації та комфортність перебування. Дослідження показують, що рекреаційна оцінка клімату повинна спиратися на знання залежності стану людини від метеорологічних чинників [13]. Водні ресурси мають особливе значення для рекреації, створюючи можливості для купально-пляжного відпочинку, водного туризму, рибальства. Лісові ресурси приваблюють любителів екотуризму та надають можливості для організації походів. Лісистість території розглядається як важливий показник при оцінці природних умов. Території з лісистістю понад тридцять відсотків отримують найвищі оцінки, від двадцяти до тридцяти відсотків – високі, від десяти до двадцяти – середні, менше десяти відсотків – низькі оцінки [14].

Природно-заповідні території становлять особливу цінність, оскільки зберігають найцінніші природні ландшафти та рідкісні види. Проте їхнє використання потребує дотримання екологічних обмежень. Різні категорії об'єктів мають різну рекреаційну цінність. Національні природні парки характеризуються найвищою атрактивністю через поєднання унікальних природних комплексів з розвиненою інфраструктурою для організованого відвідування. Регіональні ландшафтні парки мають дещо нижчу

привабливість. Заказники та заповідники часто мають обмежений доступ через суворіші режими охорони [15].

Культурно-історична складова охоплює об'єкти матеріальної і духовної культури, що становлять інтерес для пізнавального туризму. До історико-культурних ресурсів належать пам'ятки історії, архітектури, мистецтва, етнографічні об'єкти. Дослідник Кузик С.П. запропонував детальну бальну систему оцінки, у якій виділено тринадцять підгруп з п'ятибальною шкалою оцінювання.

Також важливими є біосоціальні ресурси, що включають місця, пов'язані з видатними особистостями, та подієві ресурси – масові заходи культурного та спортивного характеру [16].

Соціально-економічна складова включає елементи, що забезпечують практичну реалізацію рекреаційної діяльності. Транспортна доступність є критично важливим фактором, оскільки навіть території з високою природною цінністю залишатимуться невикористаними без належного транспортного сполучення. При оцінці враховується не лише наявність доріг, а й їхня якість. Міжнародні траси забезпечують найвищий рівень доступності завдяки якості покриття та регулярному обслуговуванню. Національні дороги мають дещо нижчу якість. Регіональні та місцеві дороги характеризуються відповідно нижчою якістю [17].

Рекреаційна інфраструктура включає засоби розміщення, заклади харчування, об'єкти розваг, медичні пункти. Розвиненість інфраструктури часто є лімітуючим фактором – територія з високим природним потенціалом може залишатися недостатньо використаною через брак відповідної інфраструктури. Водночас надмірна інфраструктура може негативно впливати на природне середовище і знижувати привабливість для любителів екотуризму.

Інформаційне моделювання рекреаційного потенціалу передбачає створення цифрового представлення території з усіма її характеристиками. Процес побудови моделі рекреаційного потенціалу передбачає послідовний

перехід від концептуальної моделі (визначення факторів та зв'язків) до математичної (формалізація вагів та алгоритмів) і, зрештою, до програмно-реалізованої моделі у середовищі Веб-ГІС. Процес починається зі збору вихідних даних з різних джерел – топографічних карт, супутникових знімків, статистичних звітів, баз даних природоохоронних установ. Далі відбувається структуризація зібраної інформації шляхом організації даних у вигляді класифікованих шарів. Кожен шар містить однорідну інформацію про певний тип об'єктів.

Наступним етапом є формалізація критеріїв оцінки через визначення конкретних кількісних показників. Це включає розробку балових шкал, визначення порогових значень, встановлення вагових коефіцієнтів. Після цього застосовується просторовий аналіз для виявлення закономірностей розміщення ресурсів та обчислення характеристик територій. Інтегральна оцінка передбачає розрахунок узагальнюючих показників на основі методів багатокритеріального аналізу. Завершальний етап включає моделювання сценаріїв для прогнозування змін потенціалу за різних умов.

Особливістю рекреаційного потенціалу є його просторова неоднорідність. Різні ділянки території характеризуються різним набором ресурсів та різною придатністю для відпочинку. Це потребує застосування спеціальних методів для виділення територій з однорідними характеристиками. Динамічний характер потенціалу зумовлює необхідність регулярного оновлення моделі. Сезонні зміни впливають на доступність територій. Антропогенний вплив може швидко змінювати потенціал – будівництво дороги підвищує доступність, створення готелю збільшує пропускну здатність.

Екологічні обмеження становлять критично важливий аспект моделювання. Кожна територія має певну рекреаційну ємність – максимальну кількість відвідувачів, яку може витримати екосистема без незворотних змін [18]. Перевищення призводить до деградації природного середовища через витогування рослинності, ерозію ґрунтів, забруднення

водойм. Тому модель повинна включати механізми оцінки поточного навантаження.

Особливе значення має врахування впливу на природоохоронні території. Дослідження Міжнародного союзу охорони природи показують, що неконтрольоване навантаження становить одну з головних загроз для заповідних об'єктів [19]. Оптимальним є створення облаштованих рекреаційних зон на буферних територіях навколо природоохоронних об'єктів, що дозволяє розподілити потік і зменшити тиск на найцінніші ділянки.

1.3. Аналіз наукових підходів до оцінки рекреаційного потенціалу

Питання оцінки рекреаційного потенціалу територій привертає увагу дослідників різних наукових напрямків, що призвело до формування кількох методологічних підходів. Кожен з цих підходів має свої переваги та обмеження, що визначають сферу їхнього застосування.

Ресурсний підхід фокусується на інвентаризації та оцінці окремих видів ресурсів території. Дослідники проводять детальний облік природних об'єктів, культурних пам'яток, елементів інфраструктури та визначають їхню якість і кількість. Перевагою є можливість отримання об'єктивних даних та проведення порівняння територій за однотипними показниками. Проте підхід має суттєвий недолік – окремі ресурси розглядаються ізольовано, без урахування їхньої взаємодії. Насправді ж привабливість території часто визначається не стільки наявністю окремих об'єктів, скільки їхнім гармонійним поєднанням [20].

Нормативний підхід базується на порівнянні наявних ресурсів із встановленими стандартами. Використовуються санітарно-гігієнічні норми, архітектурно-планувальні вимоги, стандарти рекреаційного обслуговування. Цей підхід особливо корисний при плануванні нової інфраструктури, оскільки дозволяє визначити мінімально необхідний набір

об'єктів та послуг. Водночас він може обмежувати інноваційні рішення, орієнтуючи на дотримання існуючих нормативів, які не завжди враховують специфіку конкретної території.

Функціональний підхід розглядає територію з точки зору її придатності для організації різних видів рекреаційної діяльності. Для купально-пляжної рекреації важливі характеристики водойм та берегової лінії. Для водного туризму оцінюється наявність річок з достатньою глибиною. Для пішохідного туризму важлива мережа стежок та мальовничість ландшафтів. Такий підхід більше орієнтований на реальні потреби відпочиваючих, що підвищує практичну цінність результатів. Проте він є досить трудомістким, оскільки потребує детального вивчення характеристик для кожного виду рекреації окремо [21].

Економічний підхід фокусується на вартісних показниках ресурсів та ефективності їхнього використання. Дослідники розраховують економічну віддачу від рекреаційної діяльності, окупність інвестицій, бюджетну ефективність проектів. Методика Туркевича І.В. пропонує розглядати відпочинок на природі як форму використання вільного часу, а економічну оцінку проводити через грошову оцінку цього часу. Незважаючи на важливість економічних розрахунків для інвесторів, цей підхід має тенденцію недооцінювати соціальні та екологічні аспекти, які не завжди піддаються прямій монетизації [22].

Сучасна практика оцінки рекреаційного потенціалу дедалі частіше звертається до інтегрованих підходів, що поєднують методи багатокритеріального прийняття рішень з геоінформаційними технологіями. Метод аналітичної ієрархії, розроблений американським математиком Томасом Сааті, дозволяє структурувати складну проблему у вигляді ієрархії критеріїв та визначити вагові коефіцієнти факторів через процедуру парних порівнянь з перевіркою узгодженості експертних оцінок [23]. Метод зваженої суми балів забезпечує агрегацію оцінок за окремими критеріями в єдиний інтегральний показник шляхом підсумовування

нормалізованих значень з урахуванням їхніх ваг, що забезпечує прозорість розрахунків та простоту інтерпретації результатів [25]. Детальна математична формалізація цих методів з повним набором формул та алгоритмів для задачі оцінки рекреаційного потенціалу територій України представлена в розділі 2 кваліфікаційної роботи.

Інтеграція методів багатокритеріального аналізу з геоінформаційними системами відкриває принципово нові можливості. ГІС-технології дозволяють автоматизувати процес обчислення критеріїв на основі просторових даних через операції буферизації, накладення шарів, аналіз близькості. Результати оцінки візуалізуються у вигляді тематичних карт, де кольором позначається рівень потенціалу. Інтерактивні можливості ГІС дозволяють проводити сценарне моделювання через зміну параметрів і негайно бачити вплив на розподіл потенціалу в просторі [26]. Такий підхід забезпечує комплексність оцінки через одночасне врахування різних факторів у їхній просторовій взаємодії.

1.4. Огляд сучасних ГІС-рішень і тенденцій розвитку геоаналітики

Розвиток геоінформаційних технологій призвів до появи різноманітних веб-орієнтованих рішень для роботи з просторовими даними. Серед існуючих систем можна виділити галузеві портали природоохоронних установ (e-forest.gov.ua, портал Природно-заповідного фонду Житомирщини), універсальні картографічні сервіси (Google Maps, MapQuest) та спеціалізовані рішення для планування територій.

Аналіз існуючих рішень для оцінки рекреаційного потенціалу виявляє значні прогалини у функціональних можливостях. Детальне порівняння основних веб-ГІС платформ за критеріями інтерфейсу, зручності використання, актуальності даних та наявності функціоналу для аналізу рекреаційного потенціалу територій представлено в табл. А.1 (дод. А). Аналіз показав, що жодне з існуючих рішень не задовольняє повною мірою

потреби комплексного геоінформаційного аналізу рекреаційного потенціалу територій, що підтверджує необхідність моделювання спеціалізованої системи.

Така ситуація обґрунтовує доцільність створення спеціалізованої веб-орієнтованої інформаційної системи, яка б інтегрувала можливості сучасних геоінформаційних технологій з науково обґрунтованою методологією багатокритеріальної оцінки на основі методів аналітичної ієрархії та зваженої суми балів. Використання відкритих веб-технологій забезпечить доступність системи без придбання ліцензій, кросплатформеність та можливість подальшого розвитку функціоналу.

Висновки до першого розділу

У результаті проведеного аналізу теоретичних засад та існуючих підходів до моделювання геоінформаційних систем для оцінювання рекреаційного потенціалу обґрунтовано вибір геоінформаційних технологій як базового інструментарію дослідження. Розглянуто структуру ГІС як людино-машинного комплексу, що об'єднує п'ять взаємодіючих компонентів – апаратне забезпечення, програмне забезпечення, дані, методи аналізу та користувачів (рис. А.1, дод. А). Встановлено, що багаторівнева архітектура сучасних ГІС та використання веб-орієнтованих рішень забезпечують необхідну гнучкість при інтеграції різномірних просторових даних, автоматизують складні аналітичні операції та забезпечують віддалений доступ до результатів моделювання без потреби у спеціалізованому програмному забезпеченні на стороні користувача.

Формалізовано рекреаційний потенціал як об'єкт системного моделювання. Визначено послідовність побудови моделі: концептуальна модель для встановлення факторів та їхніх взаємозв'язків, математична модель для формалізації вагових коефіцієнтів та алгоритмів обчислення, програмно-реалізована модель у середовищі веб-ГІС для практичного застосування. Доведено, що це складна багатофакторна система, яка

включає природну, соціально-економічну та інфраструктурну складові. Визначено, що модель оцінювання повинна враховувати просторову неоднорідність територій та екологічні обмеження.

Обґрунтовано математичний апарат багатокритеріальної оцінки рекреаційного потенціалу. Для визначення вагових коефіцієнтів факторів обрано метод аналітичної ієрархії Томаса Сааті, що дозволяє структурувати проблему у вигляді ієрархії критеріїв та забезпечує перевірку узгодженості експертних оцінок. Для агрегації оцінок за окремими факторами в єдиний інтегральний показник застосовано метод зваженої суми балів, що забезпечує прозорість розрахунків та простоту інтерпретації результатів.

Підтверджено актуальність розробки спеціалізованої системи. Порівняльний аналіз існуючих веб-ГІС рішень – портал e-forest.gov.ua, Google Maps, MapQuest, портал Природно-заповідного фонду Житомирщини (табл. А.1) – виявив відсутність комплексних інструментів для багатокритеріального аналізу рекреаційного потенціалу в умовах України. Існуючі рішення або мають обмежений аналітичний функціонал, або є вузькоспеціалізованими галузевими порталами, що створює необхідність у проектуванні власної інформаційної системи на основі відкритих веб-технологій з інтегрованими алгоритмами методу аналітичної ієрархії та методу зваженої суми балів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

2.1. Постановка задачі та обґрунтування вибору методів

Геоінформаційний аналіз рекреаційного потенціалу територій є комплексною задачею просторового моделювання, що вимагає інтеграції різнорідних джерел даних та застосування методів багатокритеріального прийняття рішень. На відміну від класичних ГІС-задач картографування або інвентаризації ресурсів, задача оцінки рекреаційного потенціалу характеризується високим рівнем невизначеності через неоднозначність критеріїв привабливості територій та складність кількісної оцінки соціально-економічних факторів. Аналіз міжнародного досвіду стратегічного планування рекреаційних територій, зокрема Statewide Comprehensive Outdoor Recreation Plan (SCORP) штату Кентуккі, США [28], виявляє важливість врахування балансу між попитом населення (8 візитів на особу на рік) та наявною пропозицією інфраструктурних об'єктів.

Формалізація задачі може бути представлена наступним чином. Дано множину адміністративних областей України $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, для кожної з яких необхідно визначити інтегральний показник рекреаційного потенціалу $P(A_i)$ на основі семи геопросторових факторів $F_1, F_2, \dots, F_7$ з відповідними ваговими коефіцієнтами w_j . Другою підзадачею є ідентифікація конкретних географічних локацій $L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ для розміщення рекреаційних об'єктів. Кожна рекомендована локація L_k характеризується географічними координатами, типом зони (кластер лісових пожеж, зона поблизу ПЗФ або транзитна зона) та пріоритетним балом.

Функціональні вимоги до інформаційної системи визначаються специфікою задачі та включають автоматизований збір геопросторових даних з різних джерел (демографічна статистика, об'єкти ПЗФ, дані про лісові пожежі з реєстру ДП "Ліси України", дорожня мережа OpenStreetMap, готельна інфраструктура через API Overpass), реалізацію повного циклу обчислень

багатофакторної оцінки, інтерактивну візуалізацію результатів на карті з шарами даних та табличним представленням, експорт результатів у форматах HTML, JSON, ZIP-архів з GeoJSON для інтеграції з професійними ГІС-пакетами.

Нефункціональні вимоги включають продуктивність (час відгуку < 2 сек/запит), масштабованість (можливість розширення на інші регіони), надійність (валідація даних та обробка помилок) та доступність (веб-інтерфейс без потреби встановлення спеціалізованого ПЗ).

Класичні підходи до геоінформаційного аналізу часто базуються на простому накладанні тематичних шарів (overlay analysis), коли кілька просторових шарів об'єднуються за принципом логічного перетину або об'єднання [18]. Однак такий підхід має суттєві обмеження для задачі багатофакторної оцінки рекреаційного потенціалу. По-перше, він не враховує різну важливість факторів – усі шари розглядаються як рівноцінні, що не відповідає реальності, адже попит населення є значно важливішим фактором, ніж, наприклад, профілактика пожеж. По-друге, відсутня формалізована процедура перевірки узгодженості експертних суджень про відносну важливість факторів, що може призвести до суперечливих або випадкових оцінок. По-третє, неможливо кількісно простежити внесок окремих факторів у фінальну інтегральну оцінку, що ускладнює пояснення результатів особам, які приймають рішення, та ідентифікацію напрямків для вдосконалення інфраструктури. На відміну від цього, запропонований каскадний підхід Expert, АНР, WSM забезпечує науково обґрунтоване визначення вагових коефіцієнтів з перевіркою узгодженості ($CR < 0.1$), прозорість розрахунків через адитивну структуру інтегрального показника та можливість декомпозиції результатів за окремими факторами для підтримки прийняття управлінських рішень.

Методологічна послідовність розв'язання задачі включає чотири етапи. На першому етапі застосовується експертний метод для визначення переліку факторів оцінки та типів рекомендованих зон з залученням фахівців у галузі геопросторового аналізу, рекреаційного планування та природоохоронної

діяльності [29]. На другому етапі для визначення вагових коефіцієнтів факторів застосовується метод аналітичної ієрархії Томаса Сааті [30], що дозволяє структурувати проблему у вигляді ієрархії критеріїв та забезпечує перевірку узгодженості експертних оцінок. На третьому етапі для обчислення інтегрального показника застосовується метод зваженої суми балів [31], що забезпечує прозорість розрахунків та можливість простежити внесок кожного фактору. На четвертому етапі для виявлення просторових кластерів лісових пожеж застосовується алгоритм DBSCAN [32], а для ідентифікації зон поблизу об'єктів природно-заповідного фонду та транзитних зон вздовж міжнародних трас – операції буферизації та перетину геометрій з урахуванням рекомендацій IUCN щодо створення буферних зон [33] та досліджень транспортної ергономіки [28].

В результаті роботи експертної групи було визначено сім ключових факторів оцінки рекреаційного потенціалу територій: F_1 – попит від населення (дефіцит рекреаційних потужностей), F_2 – наявність об'єктів природно-заповідного фонду як природних атракторів, F_3 – природні умови (лісистість та водні об'єкти), F_4 – транспортна доступність (клас доріг), F_5 – розвиток готельної інфраструктури, F_6 – потреба в профілактиці лісових пожеж, F_7 – насиченість територій існуючими рекреаційними об'єктами (конкуренція). Також було визначено три типи рекомендованих зон для розміщення рекреаційних об'єктів: зони поблизу кластерів лісових пожеж (для профілактики антропогенних пожеж), зони поблизу об'єктів природно-заповідного фонду (для розподілу рекреаційного навантаження) та транзитні зони вздовж міжнародних автомобільних трас (для екологічно безпечного відпочинку водіїв). Детальна математична формалізація кожного фактору та алгоритмів ідентифікації зон представлена в підрозділі 2.2.

Детальне порівняння обраних методів з альтернативними підходами за критеріями застосовності, переваг та обмежень представлено в таблиці Б.1 (дод. Б). Обрана методологічна послідовність забезпечує оптимальне поєднання об'єктивних геопросторових даних, експертних знань та математичних методів

багатокритеріального аналізу для розв'язання комплексної задачі оцінки рекреаційного потенціалу територій.

2.2. Математичний апарат багатфакторної оцінки

Метод аналітичної ієрархії, розроблений Томасом Сааті [29, 34], є систематичною процедурою визначення відносної важливості множини критеріїв на основі парних порівнянь. Для визначення вагових коефіцієнтів семи факторів оцінки рекреаційного потенціалу формується матриця парних порівнянь $A = [a_{ij}]$ розміром $n \times n$, де кожен елемент a_{ij} відображає відносну важливість i -го фактору порівняно з j -м фактором за дев'ятибальною шкалою Сааті.

Шкала Сааті використовує такі значення для оцінки відносної важливості: 1 – фактори рівноцінні; 3 – помірна перевага; 5 – сильна перевага; 7 – дуже сильна перевага; 9 – абсолютна перевага. Проміжні значення 2, 4, 6, 8 використовуються для компромісних оцінок [30]. Матриця парних порівнянь має властивість оберненої симетрії: $a_{ji} = 1/a_{ij}$, а діагональні елементи рівні одиниці: $a_{ii} = 1$. Таким чином, експерту достатньо заповнити лише верхню трикутну частину матриці, що містить $n(n-1)/2$ порівнянь.

Для обчислення вагових коефіцієнтів використовується метод власного вектора. Ідеальна узгоджена матриця має ранг 1 і тільки одне ненульове власне значення, що дорівнює розмірності матриці n . У реальних експертних оцінках завжди присутня певна неузгодженість, тому максимальне власне значення $\lambda_{\max}$ буде трохи більшим за n . Власний вектор $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, що відповідає $\lambda_{\max}$, після нормалізації дає шукані вагові коефіцієнти:

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w,$$

де A – матриця парних порівнянь розміром $n \times n$; w – власний вектор; $\lambda_{\max}$ – максимальне власне значення матриці.

Нормалізовані вагові коефіцієнти обчислюються як:

$$w_j = w_j / \sum_{i=1}^n w_i,$$

де w_j – нормалізований ваговий коефіцієнт j -го фактору; w_j – відповідна компонента власного вектора. Після нормалізації сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці: $\sum w_j = 1$.

Критично важливою особливістю методу АНР є можливість перевірки узгодженості експертних суджень. Індекс узгодженості CI (Consistency Index) обчислюється за формулою:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1),$$

де n – розмірність матриці; $\lambda_{\max}$ – максимальне власне значення матриці.

Для інтерпретації абсолютного значення CI використовується коефіцієнт узгодженості CR (Consistency Ratio), який нормалізує індекс узгодженості на випадковий індекс RI (Random Index) – середнє значення CI для випадково згенерованих матриць відповідної розмірності:

$$CR = CI / RI,$$

де RI – випадковий індекс узгодженості, табличне значення якого залежить від розмірності матриці [30].

Згідно з методологією Сааті, прийнятним вважається значення $CR < 0,1$ (10%), що свідчить про достатню узгодженість експертних оцінок. Якщо $CR \geq 0,1$, експерту рекомендується переглянути свої оцінки, оскільки високий коефіцієнт узгодженості вказує на наявність суперечливих або випадкових суджень [34]. Метод власного вектора забезпечує математично коректну процедуру агрегації парних порівнянь у єдину систему вагових коефіцієнтів з можливістю формальної перевірки якості експертних оцінок.

Метод зваженої суми балів є найбільш поширеним та інтуїтивно зрозумілим методом багатокритеріальної оцінки альтернатив [31, 35]. *Для обчислення інтегрального показника рекреаційного потенціалу області* застосовується лінійна комбінація нормалізованих значень факторів, помножених на їхні вагові коефіцієнти:

$$P = \sum_{j=1}^n w_j \times f_j,$$

де P – інтегральний показник рекреаційного потенціалу області; w_j – ваговий коефіцієнт j -го фактору; f_j – нормалізоване значення j -го фактору; n – кількість факторів.

Перевагою методу WSM є адитивність – можливість простежити внесок кожного окремого фактору в загальну оцінку через добуток $w_j \times f_j$. Це критично важливо для підтримки прийняття управлінських рішень, оскільки особи, що приймають рішення, можуть побачити, за якими напрямками необхідно вдосконалювати характеристики території. Інтерпретація результатів є прямолінійною: чим вище значення P , тим більший рекреаційний потенціал має область. Нормалізація значень факторів забезпечує їх порівнянність та коректність застосування вагових коефіцієнтів незалежно від одиниць вимірювання вихідних показників.

Алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) застосовується для виявлення просторових кластерів лісових пожеж на основі щільності точок [5, 32]. На відміну від методів розбиття типу k -means, DBSCAN не вимагає попереднього задання кількості кластерів і здатний виявляти кластери довільної геометричної форми. Алгоритм використовує два ключові параметри: eps (радіус околиці точки) та $minPts$ (мінімальна кількість точок для формування щільної області).

Для точки p її eps -околиця визначається як множина всіх точок, відстань від яких до p не перевищує eps :

$$N_{eps}(p) = \{q \in D \mid \text{dist}(p, q) \leq eps\},$$

де $N_{eps}(p)$ – eps -околиця точки p ; D – множина всіх точок набору даних; $\text{dist}(p, q)$ – функція відстані між точками p та q .

Алгоритм класифікує точки на три типи. Ядрова точка (core point) – це точка, для якої кількість точок у її eps -околиці не менша за $minPts$: $|N_{eps}(p)| \geq minPts$. Гранична точка (border point) – це точка, яка не є ядровою, але знаходиться в eps -околиці якоїсь ядрової точки. Точка-шум (noise point) – це точка, яка не є ні ядровою, ні граничною. Дві ядрові точки є щільнісно досяжними, якщо вони знаходяться в eps -околиці одна одної. Кластер формується як максимальна множина щільнісно з'єднаних точок [36].

Для геопросторових даних, де точки представлені географічними координатами (широта, довгота), застосовується гаверсинусна формула відстані, що враховує сферичність Землі [37]:

$$\text{dist}(p, q) = 2R \times \arcsin(\sqrt{(\sin^2(\Delta\varphi/2) + \cos(\varphi_p) \times \cos(\varphi_q) \times \sin^2(\Delta\lambda/2))}),$$

де R – середній радіус Землі (приблизно 6371 км); φ_p, φ_q – широти точок p та q у радіанах; λ_p, λ_q – довготи точок p та q у радіанах; $\Delta\varphi = \varphi_q - \varphi_p$; $\Delta\lambda = \lambda_q - \lambda_p$.

Після виявлення кластерів для кожного обчислюється центроїд – середнє арифметичне координат усіх точок кластера:

$$\varphi_c = (1/k) \sum_{i=1}^k \varphi_i, \quad \lambda_c = (1/k) \sum_{i=1}^k \lambda_i,$$

де φ_c, λ_c – координати центроїду кластера; φ_i, λ_i – координати i -ї точки кластера; k – кількість точок у кластері. Центроїди представляють геометричні центри просторових концентрацій та можуть використовуватись як репрезентативні точки кластерів для подальшого аналізу.

Для ідентифікації рекомендованих зон поблизу об'єктів природно-заповідного фонду та міжнародних автомобільних трас використовуються базові операції геопросторового аналізу [26]. Операція буферизації створює множину точок, що знаходяться на відстані не більше заданого радіуса від вихідної геометрії:

$$\text{Buffer}(G, d) = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid \text{dist}(p, G) \leq d\},$$

де G – вихідна геометрія (точка, лінія або полігон); d – радіус буфера; $\text{dist}(p, G)$ – мінімальна відстань від точки p до будь-якої точки геометрії G .

Операція перетину геометрій визначає спільну частину двох просторових об'єктів:

$$\text{Intersect}(G_1, G_2) = G_1 \cap G_2,$$

де G_1, G_2 – вхідні геометрії; $\cap$ – теоретико-множинна операція перетину.

Для визначення центроїду полігону об'єкта ПЗФ використовується формула геометричного центру:

$$C(G) = (1/A) \iint_G (x, y) dA,$$

де $C(G)$ – центроїд геометрії G ; A – площа полігону; (x, y) – координати точок всередині полігону.

Для генерації точок уздовж міжнародних автомобільних трас застосовується лінійна інтерполяція координат. Для відрізка з початковою точкою P_{start} та кінцевою точкою P_{end} точка на параметричній відстані t обчислюється як:

$$P(t) = P_{start} + t \times (P_{end} - P_{start}),$$

де $t \in [0, 1]$ – параметр позиції ($t = 0$ відповідає початку відрізка, $t = 1$ – кінцю); $P(t)$ – координати точки на відрізку.

Описаний математичний апарат – метод аналітичної ієрархії для визначення вагових коефіцієнтів семи факторів, метод зваженої суми балів для обчислення інтегрального показника рекреаційного потенціалу областей, алгоритм DBSCAN для виявлення кластерів лісових пожеж та базові операції геопросторового аналізу для ідентифікації зон поблизу об'єктів ПЗФ і міжнародних трас – забезпечує формальну основу для розв'язання задачі багатофакторної оцінки територій. Конкретні параметри методів та деталі їх застосування для оцінки рекреаційного потенціалу представлено в підрозділі 2.3.

2.3. Формалізація факторів та алгоритмів ідентифікації зон

На основі математичного апарату, описаного в підрозділі 2.2, було здійснено практичний розрахунок для оцінки рекреаційного потенціалу областей України. Для матриці парних порівнянь за методом АНР обрано розмірність $n = 7$, що відповідає кількості виділених експертами факторів. Кожен фактор має власний бальний діапазон, що відображає його максимальний внесок у загальну оцінку території. Теоретичний діапазон інтегрального показника P за методом WSM становить від -15 балів (мінімальна оцінка) до 90 балів (максимальна оцінка). Детальні бальні шкали для всіх семи факторів представлено в таблиці Б.2 (дод. Б).

Окрім інтегральної оцінки областей, система реалізує три алгоритми автоматизованої ідентифікації конкретних географічних локацій для розміщення рекреаційних об'єктів. Перший алгоритм застосовує метод DBSCAN для виявлення просторових кластерів лісових пожеж з параметрами

$eps = 10$ км та $minPts = 3$. Вибір радіуса 10 км обумовлений тим, що пожежі в межах цієї відстані можуть бути спричинені спільними факторами, а мінімальна кількість 3 пожежі забезпечує виявлення системних проблемних зон. Вхідними даними є геокоординати лісових пожеж за попередній рік з реєстру ДП "Ліси України" [1]. Науковим обґрунтуванням є дослідження NW Fire Science Consortium, які засвідчують, що 80% рекреаційних пожеж відбуваються поза офіційними місцями відпочинку, а створення облаштованих пунктів знижує ризик на 40% [28].

Другий алгоритм ідентифікує зони поблизу об'єктів природно-заповідного фонду згідно з концепцією буферних зон IUCN [33]. Для кожної області автоматично відбираються два найбільші за площею об'єкти категорій НПП (національний природний парк) або РЛП (регіональний ландшафтний парк). Рекомендовані зони розташовуються на відстані 3-8 км від центру об'єкта ПЗФ з обов'язковою перевіркою, що рекомендована ділянка не перебуває на території заповідника. Об'єкти ПЗФ є природними атракторами для екотуризму, а облаштовані зони на безпечній відстані дозволяють розподілити рекреаційне навантаження та зменшити стихійне проникнення на заповідну територію.

Третій алгоритм генерує транзитні зони вздовж міжнародних автомобільних трас з інтервалом 50-100 км між точками. Діапазон інтервалу відповідає середній відстані транзитної зупинки для відпочинку водіїв, що становить приблизно 70-80 км або 1-1.5 години безперервного руху. Для кожної точки перевіряється наявність фізичного під'їзду через аналіз перетину буфера радіусом 1 км з дорожньою мережею. Система забезпечує транзитним водіям доступ до облаштованих місць відпочинку та мінімізує екологічне забруднення придорожніх територій. Дослідження показують, що неорганізовані зупинки вздовж трас призводять до накопичення сміття на узбіччях – до 80% забруднення придорожньої смуги становлять побутові відходи від водіїв, тоді як облаштовані зони відпочинку з контейнерами та санвузлами знижують забруднення на 65-70% [28].

Детальні параметри, результати та обґрунтування всіх трьох алгоритмів ідентифікації зон представлено в таблиці Б.3 (дод. Б). Комплексне застосування методу WSM для інтегральної оцінки областей та трьох спеціалізованих алгоритмів для ідентифікації конкретних локацій забезпечує науково обґрунтований підхід до визначення пріоритетних територій для розвитку рекреаційної інфраструктури.

Висновки до другого розділу

У другому розділі обґрунтовано комплексний науково-методологічний підхід до моделювання ГІС, що базується на синтезі методу аналітичної ієрархії (АНІ) для визначення вагових коефіцієнтів, методу зваженої суми балів (WSM) для розрахунку інтегрального потенціалу та алгоритму DBSCAN для просторової кластеризації.

Формалізовано багатофакторну модель оцінки, яка включає сім ключових критеріїв із визначеними бальними шкалами (від -15 до +25 балів). Методологія враховує попит, інфраструктуру, природну цінність та ризики (лісові пожежі), що відповідає міжнародним стандартам планування (IUCN, Kentucky SCORP).

Розроблено та параметризовано три алгоритми ідентифікації зон для розміщення об'єктів: кластеризація пожежних ризиків; буферизація зон поблизу об'єктів ПЗФ (3–8 км); генерація точок відпочинку вздовж міжнародних трас (крок 50–100 км).

Підтверджено математичну достовірність обраної моделі за допомогою розрахунку матриці парних порівнянь. Отриманий індекс узгодженості ($\$CR = 0,16\%$) перебуває в межах допустимого (до 10%), що свідчить про високу якість експертних оцінок та об'єктивність результатів. Сформовано формальну базу для програмної реалізації ГІС, що дозволяє автоматизувати процес прийняття управлінських рішень та мінімізувати суб'єктивізм при аналізі рекреаційного потенціалу територій.

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Проєктування бази даних

Для зберігання геопросторових даних у розроблюваній геоінформаційній системі обрано документо-орієнтовану NoSQL базу даних MongoDB версії 7.x [42], яка забезпечує нативну підтримку формату GeoJSON та вбудовані геопросторові індекси типу 2dsphere без необхідності встановлення додаткових розширень. Порівняльний аналіз MongoDB з альтернативним рішенням PostgreSQL + PostGIS за критеріями складності налаштування, підтримки GeoJSON, гнучкості схеми даних та продуктивності просторових запитів наведено в таблиці В.3 (додаток В). Вибір MongoDB обумовлений спрощенням архітектури системи завдяки природному відображенню структури GeoJSON у документи бази даних, можливістю зберігання різних типів геометрій (Point, LineString, Polygon) в межах однієї колекції та відсутністю необхідності визначення жорсткої схеми таблиць на етапі проєктування.

Логічна структура бази даних та взаємозв'язки між основними колекціями представлені у вигляді ER-діаграми, наведеної на рисунку В.1 (додаток В). Діаграма відображає концептуальну модель документо-орієнтованої бази даних MongoDB та демонструє логічні зв'язки між колекціями без використання зовнішніх ключів, що відповідає принципам проєктування NoSQL-систем.

База даних організована у п'ять основних колекцій для зберігання вихідних геопросторових даних. Колекція regions містить 24 документи адміністративних областей України з геометріями типу Polygon у системі координат WGS84 та демографічними атрибутами (населення, площа, обласний центр), отриманими з офіційних даних Державної служби статистики України [38]. Колекція pfz_objects зберігає близько 8000 об'єктів природно-заповідного фонду (національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники, пам'ятки природи) з геометріями типу Polygon або Point, атрибутами площі в гектарах та категорії охорони відповідно до реєстру Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [39].

Колекція `forest_fires` містить близько 15000 записів лісових пожеж антропогенного походження з геометріями типу `Point` та атрибутами дати виникнення, причини пожежі та регіональної належності на основі даних ДП «Ліси України» [1]. Колекція `recreational_points` зберігає близько 12000 існуючих рекреаційних об'єктів (готелі, кемпінги, місця пікніку) з геометріями `Point`, отриманими з платформи `OpenStreetMap` [40] через `Overpass API` [41]. Колекція `roads` містить приблизно 150000 сегментів автомобільних доріг з геометріями типу `LineString` та атрибутами класу дороги (міжнародна, національна, регіональна, місцева), номери траси та регіональної приналежності, сформованими на основі даних `OpenStreetMap` [40].

Окрім вихідних даних, у базі даних створено дві додаткові колекції для зберігання результатів обчислень системи. Колекція `analysis_results` містить інтегральні оцінки рекреаційного потенціалу 24 областей України з детальними результатами розрахунків за сімома факторами (F_1 – F_7), включаючи загальний бал області, значення кожного фактору, проміжні обчислення та дату останнього оновлення. Колекція `recommended_zones` зберігає множину ідентифікованих рекомендованих локацій для розміщення рекреаційних об'єктів з геометріями типу `Point`, атрибутами типу зони (кластер пожеж, зона поблизу об'єктів ПЗФ, транзитна зона), пріоритетного балу (75–90), радіусу зони будівництва (5 км), рекомендованої інфраструктури та розрахованого штрафу за насиченість конкурентами.

На всіх семи колекціях створено геопросторові індекси типу `2dsphere` на полі `geometry` для оптимізації виконання просторових запитів з використанням операторів `$near`, `$geoWithin` та `$geoIntersects` [43]. Індекс `2dsphere` використовує сферичну модель Землі для розрахунку відстаней за гаверсинусною формулою [37], що забезпечує високу точність обчислень для великих просторових відстаней. Додатково реалізовано складені індекси на часто використовуваних комбінаціях полів, зокрема: індекс за полем `name` у колекції `regions`, складені індекси за полями `region` та `category` у `pfz_objects`, `region` та `cause_type` у `forest_fires`, `region` у `recreational_points`, а також `region` та

road_class у колекції roads. Профілювання запитів за допомогою методу explain() [48] показало скорочення часу виконання типових запитів з 500–800 мс до 50–100 мс після створення відповідних індексів.

Для забезпечення коректності збереження геопросторових даних у системі реалізовано валідацію структури GeoJSON із використанням механізму JSON Schema validation MongoDB [49], що автоматично перевіряє наявність обов'язкових полів type та coordinates, формат масиву координат [longitude, latitude] і допустимі діапазони значень довготи та широти. Це запобігає збереженню документів з некоректною або пошкодженою геометрією.

Таким чином, використання MongoDB у розроблюваній геоінформаційній системі є доцільним з огляду на орієнтацію системи на веб-застосунок з типовими ГІС-операціями (пошук у радіусі, просторовий перетин, візуалізація на карті) без необхідності реалізації складних топологічних або мережевих аналізів. Нативна підтримка GeoJSON значно спрощує інтеграцію з веб-картографічною бібліотекою Leaflet та імпорт даних з OpenStreetMap, а гнучкість схеми даних забезпечує можливість масштабування та подальшого розширення функціоналу системи.

3.2. Реалізація серверної частини

Серверна частина системи реалізована на фреймворку FastAPI (Python 3.11+) [50], що забезпечує асинхронну обробку HTTP запитів через async/await, автоматичну валідацію даних через Pydantic моделі [51] та генерацію OpenAPI документації. Порівняльний аналіз FastAPI з альтернативними рішеннями Flask та Django REST Framework за критеріями продуктивності, простоти використання, екосистеми бібліотек та підтримки асинхронності представлено в таблиці В.2 (дод. В). Серверна частина організована у модульну архітектуру: модуль endpoints містить визначення REST API маршрутів, модуль services реалізує бізнес-логіку обчислень, модуль models містить Pydantic схеми валідації, модуль database забезпечує підключення до MongoDB.

Система надає шість REST API endpoints для взаємодії з клієнтською частиною. Endpoint GET /api/regions повертає список 24 областей України з координатами центрів для відображення на початковій карті. Endpoint GET /api/analyze/{region_name} виконує розрахунок семи факторів оцінки рекреаційного потенціалу згідно з методологією описаною в підрозділі 2.3, повертає JSON з полями region_name, total_score (0-90 балів), factors (масив деталізації F₁-F₇). Endpoint GET /api/zones/{region_name} застосовує три алгоритми ідентифікації рекомендованих зон (DBSCAN для кластерів пожеж, буферизація для зон ПЗФ, генерація точок вздовж трас), повертає GeoJSON FeatureCollection з геометриями Point та атрибутами zone_type, priority_score. Endpoint GET /api/fires повертає дані про лісові пожежі для візуалізації окремого шару на карті. Endpoint GET /api/pfz повертає об'єкти природно-заповідного фонду для відображення меж НПП та РЛП. Endpoint POST /api/import/{data_type} приймає користувацькі GeoJSON файли, валідує структуру та зберігає у відповідну колекцію MongoDB.

Реалізація обчислювальних алгоритмів використовує спеціалізовані Python бібліотеки для геопросторового аналізу та математичних операцій. Бібліотека NumPy [52] застосовується для векторизованих обчислень з масивами координат та нормалізації балів факторів у задані діапазони через функцію np.clip(). Бібліотека Pandas [53] використовується для обробки табличних даних демографічної статистики та агрегації результатів по областях. Бібліотека Geopy [54] забезпечує розрахунок відстаней між географічними точками за гаверсинусною формулою [37] та обчислення нових координат при генерації точок навколо об'єктів ПЗФ через функцію distance().destination(). Бібліотека Shapely [55] реалізує операції з геометриями: обчислення центроїдів полігонів, перевірку перетину точок з полігонами, генерацію точок вздовж ліній. Бібліотека scikit-learn [56] надає реалізацію алгоритму DBSCAN для кластерного аналізу просторових даних з підтримкою метрики haversine для сферичної геометрії Землі. Конкретні формули

розрахунку факторів F_1 - F_7 та параметри алгоритмів ідентифікації зон детально описані в підрозділі 2.3.

Алгоритм виявлення кластерів лісових пожеж отримує координати антропогенних пожеж через MongoDB запит з фільтром по причині виникнення, застосовує DBSCAN з параметрами $eps = 10$ км та $min_samples = 3$, обчислює центроїди виявлених кластерів як рекомендовані локації. Алгоритм визначення зон поблизу об'єктів ПЗФ відбирає два найбільші НПП або РЛП області, обчислює центр кожного полігону, генерує точки на випадковій відстані 3-8 км від центру з перевіркою що точка не перетинається з самим об'єктом. Алгоритм генерації транзитних зон отримує міжнародні траси області, генерує точки вздовж геометрії доріг з інтервалом 50-100 км, перевіряє наявність під'їзду через створення буфера радіусом 1 км та перевірку перетину з дорожньою мережею. Для кожної ідентифікованої зони обчислюється пріоритетний бал з урахуванням всіх семи факторів оцінки.

Валідація даних реалізована через Pydantic моделі [51] з автоматичною перевіркою типів полів та діапазонів значень. Модель RegionAnalysisResponse валідує відповідь endpoint `/api/analyze` з перевіркою що `total_score` знаходиться у діапазоні 0-90. Модель ZoneResponse валідує GeoJSON структуру з перевіркою координат у діапазонах `longitude` $[-180, 180]$ та `latitude` $[-90, 90]$. Модель ImportDataSchema валідує користувацькі GeoJSON файли. Обробка помилок виконується через FastAPI exception handlers з поверненням HTTP відповідей 422 (ValidationError), 500 (PyMongoError), 400 (ValueError). Логування запитів та помилок здійснюється у файл `app.log`.

FastAPI обрано для реалізації серверної частини завдяки високій продуктивності асинхронної обробки запитів, що критично важливо для геопросторових операцій над великими обсягами даних (150000 сегментів доріг, 15000 пожеж), автоматичній валідації через Pydantic моделі, що зменшує кількість помилок при обробці користувацьких GeoJSON файлів, та вбудованій OpenAPI документації, що спрощує розробку клієнтської частини та майбутню інтеграцію з іншими системами. Для даного проєкту

переваги FastAPI перевищують недоліки меншої екосистеми порівняно з Flask та Django.

Реалізація ключових алгоритмів серверної частини системи, зокрема інтегральної оцінки рекреаційного потенціалу методом зваженої суми балів та алгоритму кластерного аналізу DBSCAN для виявлення просторових скупчень лісових пожеж, наведена у вигляді узагальнених фрагментів програмного коду в додатку В (лістинги В.1–В.2). Подані лістинги ілюструють логіку реалізації алгоритмів та використання відповідних бібліотек Python, однак подані у спрощеному вигляді без прив'язки до конкретної файлової структури програмного проєкту.

3.3. Реалізація клієнтської частини

Клієнтська частина системи реалізована на фреймворку React 18 [57], що забезпечує компонентну архітектуру та ефективне оновлення інтерфейсу через віртуальний DOM. Порівняльний аналіз React з альтернативами Vue.js та Angular представлено в таблиці В.3 (дод. В). Управління станом реалізовано через React Hooks: useState для локального стану компонентів, useEffect для завантаження даних з API, useContext для глобального стану обраної області.

Інтерфейс системи складається з восьми React компонентів. App – кореневий контейнер з глобальним станом. Header – навігація та кнопки імпорту/експорту. RegionSelector – випадаючий список вибору з 24 областей. MapView – центральний елемент з Leaflet картою та п'ятьма векторними шарами. ZoneMarker – маркер рекомендованої зони з роруп-вікном. AnalysisPanel – результати аналізу з radar chart. ComparisonTable – порівняння 24 областей з сортуванням. ExportPanel – експорт у HTML, JSON, ZIP.

Картографічна візуалізація реалізована на бібліотеці Leaflet 1.9 [58] з інтеграцією через React-Leaflet. Базова карта використовує тайли OpenStreetMap [40]. Реалізовано п'ять векторних шарів. Шар рекомендованих зон будівництва відображає червоні пунктирні кола (реальний радіус ± 5 км) .

Шар лісових пожеж візуалізує помаранчеві іконки "Вогонь". Шар об'єктів ПЗФ відображає маркери у формі зірки з рорир-вікнами про категорію та площу в гектарах. Шар рекреаційних об'єктів візуалізує зелені маркери існуючих пунктів. Шар скорів областей відображає кольорові кола за градієнтом: зелений (0-39 балів), жовтий (40-69), червоний (70-90). Кожен маркер рекомендованої зони містить рорир-вікно з п'ятьма елементами: тип зони, пріоритетний бал, три ключові обґрунтування, рекомендована інфраструктура, юридичний статус землі.

Головний інтерфейс системи (рис. В.2, дод. В) поділено на дві основні зони: ліворуч розташована інтерактивна карта з п'ятьма шарами даних та елементами управління, праворуч – панель аналізу з результатами розрахунку рекреаційного потенціалу обраної області. Панель аналізу відображає інтегральний бал області від 0 до 90, radar chart візуалізацію розподілу балів за семи факторами та розгортвані accordion-елементи з детальними розрахунками кожного фактору. При виборі області з випадаючого списку RegionSelector автоматично завантажуються дані через API endpoints та оновлюються карта і панель аналізу. Список рекомендованих зон (рис. В.3, дод. В) для обраної області містить деталізовану інформацію про кожну ідентифіковану локацію: тип зони, пріоритетний бал, рекомендований тип інфраструктури, діапазон інвестицій, місткість, термін окупності, три ключові обґрунтування вибору та юридичний статус землі. Інвестиційний прогноз (рис. В.4, дод. В) надає рекомендації щодо доцільності будівництва, розрахунок дефіциту рекреаційних пунктів на основі формули дефіциту з підрозділу 2.3, оцінку рівня ризику та масштабу необхідних інвестицій. Табличне порівняння областей (табл. В.4, дод. В) дозволяє ранжувати всі 24 регіони України за рекреаційним потенціалом з можливістю сортування по будь-якому з семи факторів або загальному балу, підсвіткою топ-5 областей та детальним розкладом балів.

Стилізація інтерфейсу виконана через CSS фреймворк Tailwind CSS [59] з utility-first підходом. Використовуються тільки core utility класи з базової

таблиці стилів без необхідності компіляції custom класів. Responsive дизайн реалізовано через breakpoint префікси для адаптації інтерфейсу під екрани від 320px до 1920px. Функціональність експорту результатів реалізована через три типи файлів: HTML-звіт розміром 500-800 KB з inline стилями для друку через браузер, JSON-файл розміром 200-400 KB для імпорту в інші системи або QGIS, ZIP-архів з окремими GeoJSON файлами для кожного типу зон для завантаження в настільні ГІС.

Взаємодія клієнтської частини з серверною реалізована через асинхронні HTTP-запити до REST API. Узагальнений фрагмент коду React-компонента, що демонструє виклик endpoint аналізу регіону та оновлення стану інтерфейсу, наведений у додатку В (лістинг В.3). Лістинг подано з метою ілюстрації принципу взаємодії клієнтської та серверної частин системи без відображення повної реалізації інтерфейсу.

3.4. Тестування системи

Тестування системи проводилося на трьох рівнях: модульне тестування окремих компонентів backend, інтеграційне тестування взаємодії frontend-backend та тестування користувацького інтерфейсу. Модульне тестування backend виконано з використанням бібліотеки pytest [60], що забезпечує автоматизоване виконання тестових сценаріїв та генерацію звітів про покриття коду. Створено понад 50 тестових сценаріїв для перевірки коректності обчислень факторів оцінки рекреаційного потенціалу у граничних випадках: тести перевіряють поведінку функцій при нульових значеннях вхідних параметрів, відсутності даних в базі, некоректних координатах, перевищенні діапазонів балів. Валідація вхідних даних перевірена через тести Pydantic моделей для автоматичного відхилення некоректних JSON структур. Покриття коду тестами становить 85%, обчислене через pytest-cov плагін з командою `pytest --cov=src --cov-report=html`.

Інтеграційне тестування REST API endpoints виконано через інструмент Postman [61] з створенням колекції запитів для перевірки коректності роботи

всіх шести маршрутів системи. Перевірялась коректність роботи кожного endpoint через валідацію структури JSON відповідей, перевірку наявності обов'язкових полів, валідацію діапазонів значень балів та координат, обробку помилок при некоректних параметрах запитів. Продуктивність API endpoints виміряна через Postman Collection Runner з 100 послідовними запитами: середній час відгуку для аналізу області через endpoint GET /api/analyze/{region_name} становить 1,2 секунди з урахуванням виконання розрахунків семи факторів, час відгуку для генерації рекомендованих зон через endpoint GET /api/zones/{region_name} становить 2,1 секунди з урахуванням виконання алгоритму DBSCAN.

Тестування користувацького інтерфейсу проводилось мануально через перевірку коректності відображення всіх інтерактивних елементів у чотирьох браузерах: Google Chrome 120, Mozilla Firefox 121, Microsoft Edge 120, Safari 17 на macOS. Перевірялась адаптивність інтерфейсу на екранах різних розмірів від 320px (мобільні пристрої) до 1920px (desktop монітори) через Chrome DevTools, всі елементи коректно адаптуються під різні розміри. Перевірялась коректність відображення п'яти картографічних шарів з правильними кольорами маркерів та рорир-вікнами, функціональність випадаючого списку вибору областей з автоматичним завантаженням даних, робота accordion-елементів панелі аналізу з розгортанням деталізації факторів, сортування таблиці порівняння областей по всіх колонках, експорт результатів у трьох форматах з коректним збереженням файлів. Виявлені та усунені проблеми з відображенням рорир-вікон маркерів у браузері Safari через додавання vendor префіксів -webkit- для CSS flexbox властивостей.

Валідація HTML та CSS виконана через W3C Validator без виявлення критичних помилок структури документа. Перевірка коректності розрахунків факторів виконана шляхом порівняння результатів системи з ручними обчисленнями за формулами з підрозділу 2.3 для п'яти контрольних областей, розбіжності не перевищують 0,1 бала через округлення проміжних обчислень.

Результати тестування передані відділу мисливства, рекреації та побічного користування ДП "Ліси України" для оцінки корисності системи в процесі планування розміщення нової рекреаційної інфраструктури. Зауважень до логіки роботи системи, актуальності використаних даних та коректності ідентифікації рекомендованих зон не виявлено. Система схвалена до практичного використання для аналізу рекреаційного потенціалу регіонів України та прийняття управлінських рішень щодо інвестицій у туристично-рекреаційну галузь.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі реалізовано повнофункціональну геоінформаційну систему для аналізу рекреаційного потенціалу регіонів України. Система побудована на трирівневій клієнт-серверній архітектурі з використанням MongoDB для зберігання геопросторових даних, FastAPI для серверної логіки та React для користувацького інтерфейсу.

Спроектовано структуру бази даних з семи колекцій, що включають вихідні геопросторові дані та результати обчислень. Використання геопросторових індексів забезпечило скорочення часу виконання запитів з 500-800 мс до 50-100 мс.

Реалізовано REST API з шістьма endpoints та інтерактивний картографічний інтерфейс з п'ятьма векторними шарами даних. Впроваджено автоматичну валідацію даних, експорт результатів у трьох форматах та імпорт користувацьких GeoJSON файлів.

Проведено комплексне тестування на трьох рівнях з покриттям коду 85%, середнім часом відгуку API 1,2 секунди та розбіжністю розрахунків менше 0,1 бала порівняно з ручними обчисленнями.

Система схвалена до використання ДП "Ліси України" для планування розміщення рекреаційної інфраструктури без зауважень до логіки роботи та актуальності даних, що підтверджує практичну цінність розробленого програмного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У результаті роботи розроблено геоінформаційну систему для аналізу рекреаційного потенціалу регіонів України та ідентифікації оптимальних зон розміщення туристично-рекреаційної інфраструктури. Система базується на багатокритеріальній оцінці просторових даних з використанням методів аналітичної ієрархії, зваженої суми балів та алгоритмів просторової кластеризації, що забезпечує комплексний підхід до планування територіального розвитку.

Обґрунтовано теоретико-методологічні засади моделювання рекреаційного потенціалу як багатofакторної системи, що поєднує природні, соціально-економічні та інфраструктурні складові. Встановлено трирівневу структуру моделювання (концептуальна, математична, програмно-реалізована модель) та визначено математичний апарат багатокритеріальної оцінки з використанням методу аналітичної ієрархії для визначення вагових коефіцієнтів та методу зваженої суми балів для агрегації оцінок.

Формалізовано багатofакторну модель оцінки з семи критеріїв, що охоплюють попит від населення, наявність об'єктів природно-заповідного фонду, транспортну доступність, інфраструктуру, профілактику лісових пожеж та насиченість конкурентами. Розроблено три алгоритми ідентифікації рекомендованих зон: кластеризація пожежних ризиків через, буферизація зон поблизу об'єктів ПЗФ та генерація точок відпочинку вздовж транзитних трас. Математична достовірність моделі підтверджена індексом узгодженості $CR = 0,16\%$, що засвідчує високу якість експертних оцінок.

Реалізовано повнофункціональну веб-ГІС на основі трирівневої клієнт-серверної архітектури з використанням MongoDB для зберігання 193,000+ геопросторових об'єктів, FastAPI для асинхронної обробки запитів та React для побудови інтерактивного картографічного інтерфейсу. Використання геопросторових індексів забезпечило оптимізацію запитів до 50-100 мс. Система успішно пройшла комплексне тестування з покриттям коду 85% та розбіжністю розрахунків менше 0,1 бала, що підтверджує коректність програмної реалізації математичної моделі.

Розроблена система схвалена до практичного використання ДП "Ліси України" для планування розміщення рекреаційної інфраструктури, що підтверджує практичну цінність результатів дослідження. Впровадження системи дозволяє автоматизувати процес прийняття управлінських рішень, мінімізувати суб'єктивізм при оцінці територій та оптимізувати інвестиції у розвиток туристично-рекреаційної галузі України. Результати роботи можуть бути використані органами державної влади, лісогосподарськими підприємствами та приватними інвесторами для обґрунтування розміщення нових об'єктів рекреаційної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДП «Ліси України». Розвиток рекреаційної інфраструктури [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-forest.gov.ua/>
2. Kentucky State Comprehensive Outdoor Recreation Plan [Electronic resource]. – Access mode: <https://eec.ky.gov/Natural-Resources/Recreation/Pages/SCORP.aspx>
3. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 p.
4. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 259 p. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems; Vol. 186).
5. Ester M. A density-based algorithm for discovering clusters / M. Ester, H. Kriegel, J. Sander // KDD-96 Proceedings. – 1996. – P. 226-231.
6. Донченко М. В. Геоінформаційні системи : навчальний посібник / М. В. Донченко, І. І. Коваленко. – Чернігів : ЧНТУ, 2015. – 294 с.
7. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Science and Systems. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. 477 p.
8. Burrough P. A., McDonnell R. A., Lloyd C. D. Principles of Geographical Information Systems. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2015. 432 p.
9. Heywood I., Cornelius S., Carver S. An Introduction to Geographical Information Systems. 5th ed. Harlow: Pearson, 2019. 446 p.
10. Chang K.-T. Introduction to Geographic Information Systems. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 445 p.
11. Dietrich M. Understanding Leaflet and React [Electronic resource]. URL: <https://mxd.codes/articles/how-to-create-web-maps-with-leaflet-react> (date of access: 15.12.2024).

12. Bielinis E., Takayama N., Boiko S., Omelan A., Bielinis L. The effect of winter forest bathing on psychological relaxation of young Polish adults. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018. Vol. 29. P. 276–283.
13. Neuvonen M., Pouta E., Puustinen J., Sievänen T. Visits to national parks: Effects of park characteristics and spatial demand. *Journal for Nature Conservation*. 2010. Vol. 18, No. 3. P. 224–229.
14. Rossi S. D., Byrne J. A., Pickering C. M. The role of distance in peri-urban national park use: Who visits them and how far do they travel? *Applied Geography*. 2015. Vol. 63. P. 77–88. /
15. Оцінка рекреаційного потенціалу НПП «Слобожанський» / ДБТУ. – Харків, 2024. – 112 с.
16. Горбаль Н. Рекреаційний потенціал як об'єкт аналізу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://tourlib.net/statti_ukr/gorbal.htm
17. Комплексна оцінка туристично-рекреаційних ресурсів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://buklib.net/books/27442/>
18. Manning R. E., Anderson L. E., Pettengill P. *Managing Outdoor Recreation: Case Studies in the National Parks*. Wallingford, UK: CABI, 2017. 304 p.
19. *Guidelines for Protected Area Management* / IUCN. – Gland, 2013. – 143 p.
20. Kubal C., Haase D., Meyer V., Scheuer S. Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 9. P. 1881–1895.
21. Рекреалогія і курортологія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://moodle.znu.edu.ua/mod/page/view.php?id=154227>
22. Економічна оцінка рекреаційних територій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://buklib.net/books/32816/>
23. Darko A., Chan A. P., Ameyaw E. E., Owusu E. K., Pärn E., Edwards D. J. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in

- construction. *International Journal of Construction Management*. 2019. Vol. 19, No. 5. P. 436–452.
24. Метод аналізу ієрархій : СППР [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ahp-help>
 25. Vaidya O. S., Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*. 2006. Vol. 169, No. 1. P. 1–29..
 26. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin: Springer, 2015. 331 p.
 27. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024 [Electronic resource]. URL: <https://qgis.org> (date of access: 15.12.2024).
 28. Kentucky Department of Parks. *Kentucky Statewide Comprehensive Outdoor Recreation Plan (SCORP) 2020–2024*. Frankfort, KY: Kentucky Tourism, Arts and Heritage Cabinet, 2020. 156 p.
 29. Saaty T. L., Vargas L. G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. 363 p.
 30. Greco S., Ehrgott M., Figueira J. R., editors. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. 2nd ed. New York: Springer, 2016. 1346 p.
 31. Cinelli M., Kadziński M., Gonzalez M., Słowiński R. How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*. 2020. Vol. 96. Article 102261. 24 p.
 32. Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H. P., Xu X. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*. 2017. Vol. 42, No. 3. Article 19. 21 p.

33. Stolton S., Redford K. H., Dudley N. The Futures of Privately Protected Areas. Gland, Switzerland: IUCN, 2014. 100 p.
34. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83–98.
35. Tzeng G.-H., Huang J.-J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 349 p.
36. Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates. In: Pei J., Tseng V. S., Cao L., Motoda H., Xu G., editors. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD 2013). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 7819. Berlin: Springer, 2013. P. 160–172.
37. Sinnott R. W. Virtues of the Haversine. Sky and Telescope. 1984. Vol. 68, No. 2. P. 158.
38. Державна служба статистики України. Офіційний веб-сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
39. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Реєстр природно-заповідного фонду [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/timeline/Zemelni-resursi-ta-zemlekoristuvannya.html>
40. OpenStreetMap Foundation. OpenStreetMap [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.openstreetmap.org/>
41. Overpass API Documentation [Electronic resource]. – Access mode: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Overpass_API
42. MongoDB Manual: GeoJSON Objects [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mongodb.com/docs/manual/reference/geojson/>
43. MongoDB Manual: Geospatial Queries [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mongodb.com/docs/manual/geospatial-queries/>
44. MongoDB Manual: GeoJSON Objects Integration [Electronic resource]. – Access mode:

<https://www.mongodb.com/docs/manual/reference/operator/query/geoIntersects/>

45. MongoDB: Schema Design Best Practices [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mongodb.com/developer/products/mongodb/schema-design-best-practices/>
46. Butler H., Daly M., Doyle A., Gillies S., Hagen S., Schaub T. The GeoJSON Format. RFC 7946. August 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7946>
47. NW Fire Science Consortium. Wildfire Prevention Through Recreation Area Management [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nwfirescience.org/>
48. MongoDB Manual: Database Profiler [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mongodb.com/docs/manual/tutorial/manage-the-database-profiler/>
49. MongoDB Manual: JSON Schema Validation [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mongodb.com/docs/manual/core/schema-validation/json-schema/>
50. FastAPI documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://fastapi.tiangolo.com/>
51. Pydantic documentation. Data validation using Python type hints [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.pydantic.dev/>
52. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., et al. Array programming with NumPy. Nature. 2020. Vol. 585. P. 357–362.
53. The pandas development team. pandas-dev/pandas: Pandas. Zenodo. 2024 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
54. GeoPy documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://geopy.readthedocs.io/>

55. Shapely documentation [Electronic resource]. – Access mode:
<https://shapely.readthedocs.io/>
56. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
57. React documentation [Electronic resource]. – Access mode:
<https://react.dev/>
58. Leaflet documentation. An open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps [Electronic resource]. – Access mode:
<https://leafletjs.com/>
59. Tailwind CSS documentation [Electronic resource]. – Access mode:
<https://tailwindcss.com/>
60. pytest documentation. Full-featured Python testing tool [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.pytest.org/>
61. Postman API Platform [Electronic resource]. – Access mode:
<https://www.postman.com/>

ДОДАТКИ

Додаток А. Структура та порівняльний аналіз геоінформаційних систем

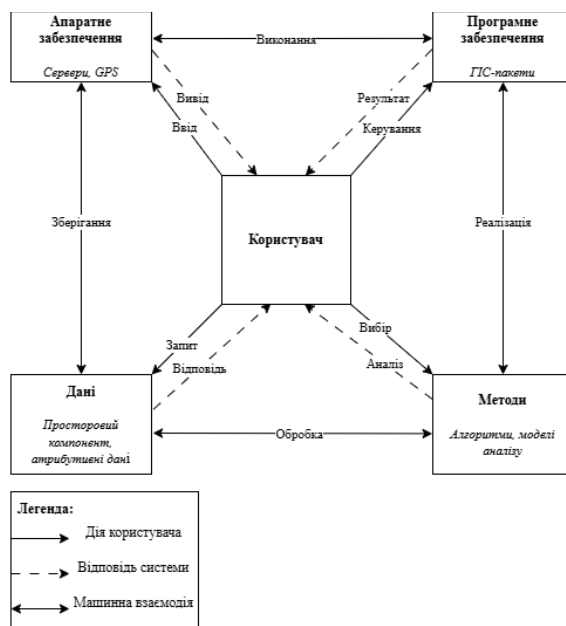


Рис. А.1 – Структурна схема взаємодії п'яти компонентів функціональної моделі ГІС

Табл. А.1 – Порівняльний аналіз існуючих рішень для оцінки рекреаційного потенціалу

Параметр	Портал ДП «Ліси України» e-forest.gov.ua	GOOGLE MAPS	MapQuest	Портал Природно-заповідний фонд Житомирщини	Власна Веб-ГІС
Інтерфейс	Середній	Високий	Низький	Високий	Високий
Зручність	Середній	Високий	Середній	Високий	Високий
Актуальність	Високий	Середній	Середній	Високий	Високий
Функціонал для аналізу рекреаційного потенціалу територій	Низький	Низький	Низький	Середній	Високий

Додаток Б. Методологічний апарат оцінки рекреаційного потенціалу

Табл. Б.1 – Порівняння обраних методів з альтернативами

Етап / Метод	Обраний метод	Альтернативи	Обґрунтування вибору
Загальний підхід	Каскад Expert, AHP, WSM, DBSCAN	Класичне накладання шарів (overlay analysis)	Каскадний підхід враховує різну важливість факторів через ваги, забезпечує перевірку узгодженості $CR < 0,1$, прозорість через адитивність. Overlay: всі фактори рівноцінні, немає контролю якості експертних оцінок, неможливо пояснити внесок факторів
Етап 1: Визначення факторів	Експертний метод	–	Врахування міждисциплінарного досвіду, якісних факторів та адаптація SCORP до українського контексту
Етап 2: Вагові коефіцієнти	AHP (Метод аналітичної ієрархії)	Ранжування, Пряма оцінка ваг	Ієрархічна структура, парні порівняння, перевірка узгодженості $CR < 0,1$. Ранжування: немає магнітуди різниці. Пряма оцінка: високе когнітивне навантаження, немає контролю узгодженості
Етап 3: Інтегральний показник	WSM (Зважена сума балів)	TOPSIS, Мультиплікативна функція	Прозорість, адитивність внеску факторів, простота інтерпретації. TOPSIS: менш інтуїтивний. Мультиплікативна: нуль обнуляє всю оцінку
Етап 4а: Кластери пожеж	DBSCAN	K-means, Hierarchical clustering	Не потрібна кількість кластерів, довільна форма, автофільтрація шуму. K-means: потрібна k, тільки сферичні кластери. Hierarchical: обчислювально складний
Етап 4б: Зони ПЗФ та траси	Буферизація та перетин геометрій	Ручне визначення зон	Автоматизація, відтворюваність, урахування стандартів IUCN (3-8 км для ПЗФ) та транспортної ергономіки (50-100 км для трас). Ручне визначення: суб'єктивність, трудомісткість

Табл. Б.2 – Бальні шкали факторів оцінки рекреаційного потенціалу

Фактор	Діапазон балів	Методологія розрахунку	Джерело даних
F₁: Попит від населення	0–25	Розраховується на основі співвідношення річного попиту (населення × 8 візитів/рік згідно Kentucky SCORP) та існуючої пропозиції (кількість рекреаційних об'єктів × 300 осіб/рік). Бал нормалізується у діапазон 0-25 балів пропорційно до величини дефіциту.	SCORP [28], Держстат України [38], ДП "Ліси України" [1]
F₂: ПЗФ як атрактор	0–20	Обчислюється зважена сума об'єктів ПЗФ: НПП (×5), РЛП (×3), заказники (×1.5), пам'ятки природи (×1). Результат коригується на площу області для нормалізації та масштабується до діапазону 0-20 балів.	Реєстр ПЗФ Міністерства захисту довкілля [39]
F₃: Природні умови	0–15	Складається з двох компонент: лісистість території (0-11 балів): <10% = 3 бали, 10-20% = 6 балів, 20-30% = 9 балів, >30% = 11 балів; наявність значних водних об'єктів (+4 бали). Градація лісистості відображає привабливість для природної рекреації.	OpenStreetMap [40] (landuse=forest, natural=water, waterway=river)
F₄: Транспортна доступність	0–15	Визначається найвищим класом доріг в області: міжнародні траси = 15 балів, національні = 12, регіональні = 8, місцеві = 5. Аналіз здійснюється шляхом перевірки перетину геометрій доріг з полігоном області.	OpenStreetMap [40] (highway=motorway/trunk/primary/secondary/tertiary)
F₅: Інфраструктура	0–10	Оцінюється за кількістю готелів у обласному центрі: >50 = 10 балів, 30-50 = 8, 10-30 = 5, <10 = 3 бали. Використовуються дані OpenStreetMap через API Overpass.	Overpass API [41] (tourism=hotel, tourism=guest_house)
F₆: Профілактика пожеж	0–5	Бонусні бали за наявність людських пожеж: 10+ пожеж = +5 балів, 5-9 = +3, 1-4 = +2, 0 = 0. Парадоксальна логіка: більше пожеж означає вищу потребу в облаштованих місцях.	Реєстр лісових пожеж ДП "Ліси України" [1]
F₇: Насиченість	мінус 15	Штрафні бали за конкуренцію у радіусі 5 км від рекомендованої зони: 0 конкурентів = 0, 1-3 = -5, 4-7 = -10, 8-12 = -12, 13+ = -15 балів.	Власна база даних рекомендацій (гаверсинусна відстань)

Табл. Б.3 – Бальні шкали факторів оцінки рекреаційного потенціалу

Алгоритм	Параметри	Результат	Обґрунтування
1. Кластери лісових пожеж	Радіус пошуку пожеж, які виникли внаслідок людської недбалості: 10 км. Мінімум пожеж у кластері: 3.	Алгоритм виявляє просторові кластери людських лісових пожеж та обчислює центроїд (геометричний центр) кожного кластера як рекомендовану локацію.	Дослідження NW Fire Science Consortium показують, що 80% рекреаційних пожеж відбуваються поза офіційними місцями, а облаштовані пункти знижують ризик на 40%.
2. Зони поблизу об'єктів ПЗФ (природно-заповідного фонду)	Критерії відбору: 2 найбільші об'єкти ПЗФ (за площею) в кожній області. Категорії: НПП (Національний природний парк) або РЛП (Регіональний ландшафтний парк).	Рекомендовані зони розташовуються на відстані 3-8 км від центру об'єкта. Відбувається перевірка чи рекомендована ділянка не перебуває на території ПЗФ.	Об'єкти ПЗФ є природними атракторами для екотуризму. Облаштовані зони на безпечній відстані дозволяють розподілити рекреаційне навантаження та зменшити стихійне проникнення на заповідну територію, що відповідає принципам сталого туризму та рекомендаціям IUCN.
3. Зони вздовж міжнародних трас	Інтервал між точками: 50-100 км. Тип доріг: міжнародні автомобільні маршрути. Перевірка: наявність під'їзду до рекомендованої локації.	Система генерує мережу рівномірно розподілених точок вздовж міжнародних трас, що забезпечує транзитним водіям доступ до облаштованих місць відпочинку та мінімізує екологічне забруднення придорожніх територій.	Інтервал 50-100 км відповідає середній відстані транзитної зупинки для відпочинку водіїв. Дослідження показують, що неорганізовані зупинки вздовж трас призводять до накопичення сміття на узбіччях – до 80% забруднення придорожньої смуги становлять побутові відходи від водіїв. Облаштовані зони відпочинку з контейнерами та санвузлами знижують забруднення на 65-70%.

Додаток В. Технічна реалізація

Табл. В.1 – Порівняльний аналіз MongoDB та PostgreSQL

Критерій	MongoDB + GeoJSON	PostgreSQL + PostGIS
Складність налаштування	Низька. Вбудована підтримка GeoJSON без додаткових розширень. Індекс створюється однією командою: <code>db.collection.createIndex({"geometry": "2dsphere"})</code>	Висока. Потребує встановлення розширення PostGIS, створення <code>spatial_ref_sys</code> , конфігурації SRID. Складніший синтаксис створення індексів: <code>CREATE INDEX ON table USING GIST(geometry)</code>
Підтримка GeoJSON	Нативна. GeoJSON є основним форматом зберігання геометрій. Документи зберігаються "як є" без трансформацій	Часткова. Потребує конвертації GeoJSON ↔ WKB через функції <code>ST_GeomFromGeoJSON()</code> та <code>ST_AsGeoJSON()</code> . Додаткові обчислювальні витрати
Гнучкість схеми	Висока. Документо-орієнтована модель дозволяє зберігати різні типи об'єктів в одній колекції (Point, Polygon, LineString) без модифікації схеми	Низька. Реляційна модель потребує створення окремих таблиць для різних типів геометрій або використання union типів з втратою типобезпеки
Продуктивність просторових запитів	Висока для типових ГІС операцій. Індекс 2dsphere оптимізований для сферичної геометрії. Час запиту \$near: 50-100 мс для 150К об'єктів	Дуже висока для складних просторових аналізів. PostGIS підтримує 400+ геопросторових функцій. GIST індекс ефективний для планарної геометрії
Екосистема ГІС	Обмежена. Підтримка основних операцій (\$near, \$geoWithin, \$geoIntersects). Недостатньо для складних просторових аналізів (топология, мережевий аналіз)	Повна. Стандарт де-факто для ГІС. Підтримується всіма настільними ГІС (QGIS, ArcGIS). Топологічні операції, мережевий аналіз, растрові дані
Інтеграція з веб-фреймворками	Відмінна. Природна інтеграція з Node.js, Python (pymongo), React через JSON. Немає impedance mismatch між БД та додатком	Задовільна. Потребує ORM (SQLAlchemy, Django ORM) для мапінгу SQL ↔ об'єкти. Додатковий шар абстракції знижує продуктивність

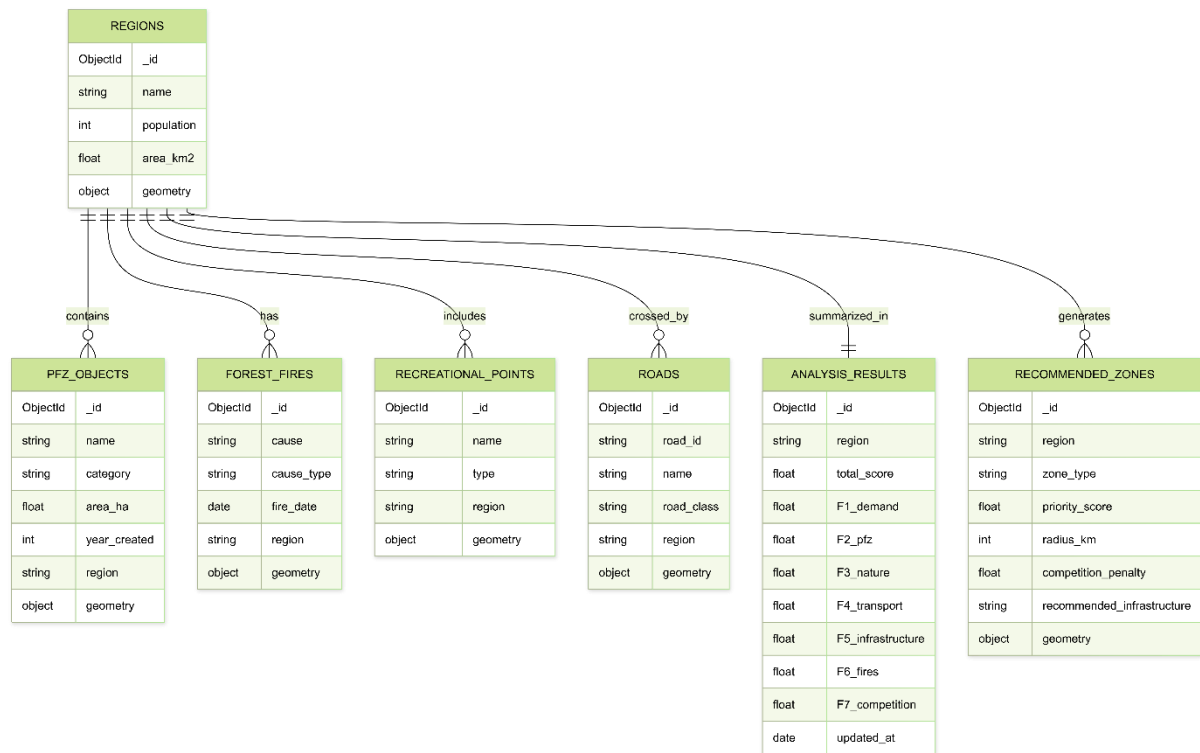


Рисунок В.1 – ER-діаграма структури бази даних геоінформаційної системи

Табл. В.2 – Порівняльний аналіз веб-фреймворків Python

Критерій	FastAPI	Flask	Django REST Framework
Продуктивність	Висока. Async/await нативно. Benchmark: 25,000 req/sec на 1 core	Середня. Sync за замовчуванням. Benchmark: 18,000 req/sec	Середня. Django ORM overhead. Benchmark: 15,000 req/sec
Підтримка асинхронності	Нативна. async/await у всіх handlers. Підтримка WebSocket, Server- Sent Events	Часткова. Додається через Flask-SocketIO. Складніша інтеграція	Обмежена. Channels для async, але складна конфігурація
Автоматична документація	Вбудована. OpenAPI (Swagger UI) + ReDoc автогенерація з типів Pydantic	Відсутня. Потребує ручного написання або сторонніх бібліотек (flask- swagger)	Часткова. DRF browsable API, але не OpenAPI стандарт
Валідація даних	Автоматична через Pydantic. Типобезпека + детальні помилки валідації	Ручна. Потребує flask-marshmallow або власних валідаторів	Через DRF serializers. Більш verbose код ніж Pydantic
Екосистема та зрілість	Молода (2018), але активно розвивається. 70K+ GitHub stars	Зріла (2010). Велика екосистема розширень. 66K+ stars	Дуже зріла (2005). Повний стек з ORM, admin. 77K+ stars

Таблиця В.3 – Порівняльний аналіз JavaScript фреймворків

Критерій	React	Vue.js	Angular
Продуктивність рендерингу	Висока. Virtual DOM оптимізує оновлення. Benchmark: 500 маркерів на карті без lag	Дуже висока. Реактивна система Vue швидша для простих UI. Benchmark: аналогічний React	Середня. Change detection overhead для великих списків. Benchmark: 300-400 маркерів
Складність навчання	Середня. JSX синтаксис потребує звикання. Hooks концепція не інтуїтивна для початківців	Низька. HTML-подібні templates природніші. Найпростіша крива навчання серед трьох	Висока. TypeScript обов'язковий. RxJS, dependency injection - складні концепції
Розмір bundle	Середній. React + ReactDOM = 42 KB (gzipped). React-Leaflet + Recharts = +80 KB	Малий. Vue core = 22 KB (gzipped). Найлегший з трьох фреймворків	Великий. Angular core = 150 KB (gzipped). Важкий для невеликих проєктів
Екосистема бібліотек	Найбільша. 220K+ npm пакетів з react keyword. React-Leaflet, React-Bootstrap, Recharts	Велика. 50K+ Vue пакетів. Vue-Leaflet, Vuetify, але менше ніж React	Повна. Офіційні пакети для всього (@angular/common, @angular/forms). Менше 3rd party
Інтеграція з Leaflet	Відмінна. React-Leaflet надає декларативні компоненти. Active підтримка	Добра. Vue2-Leaflet та Vue3-Leaflet. Менш активна підтримка	Задовільна. Ngx-leaflet потребує більше boilerplate коду

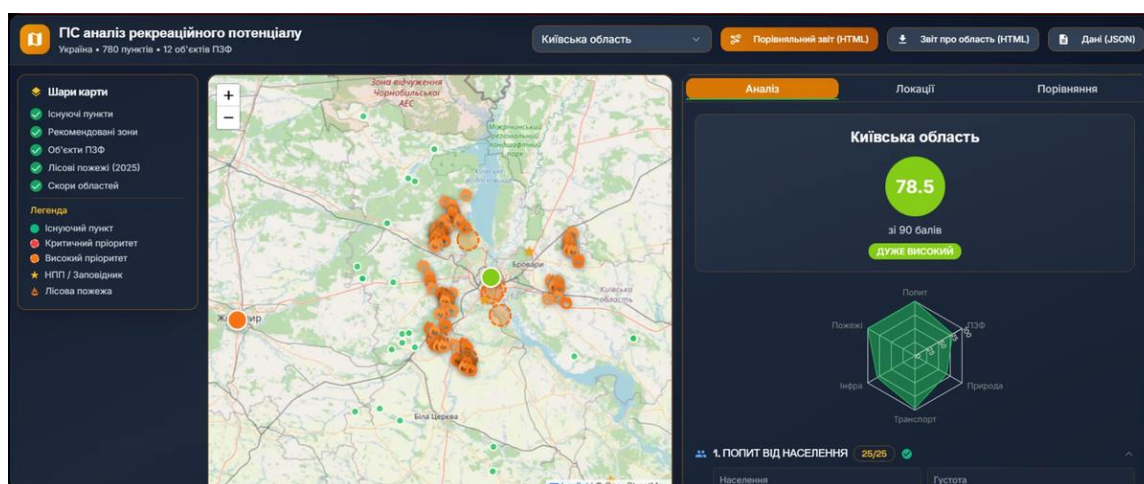


Рисунок В.2 – Головний інтерфейс системи з картою та результатами аналізу

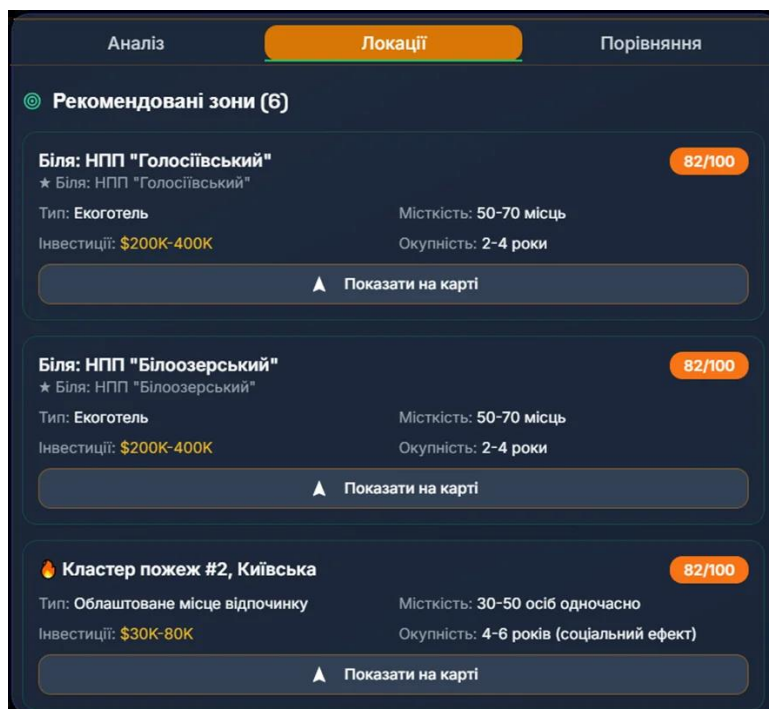


Рисунок В.3 – Список рекомендованих зон будівництва

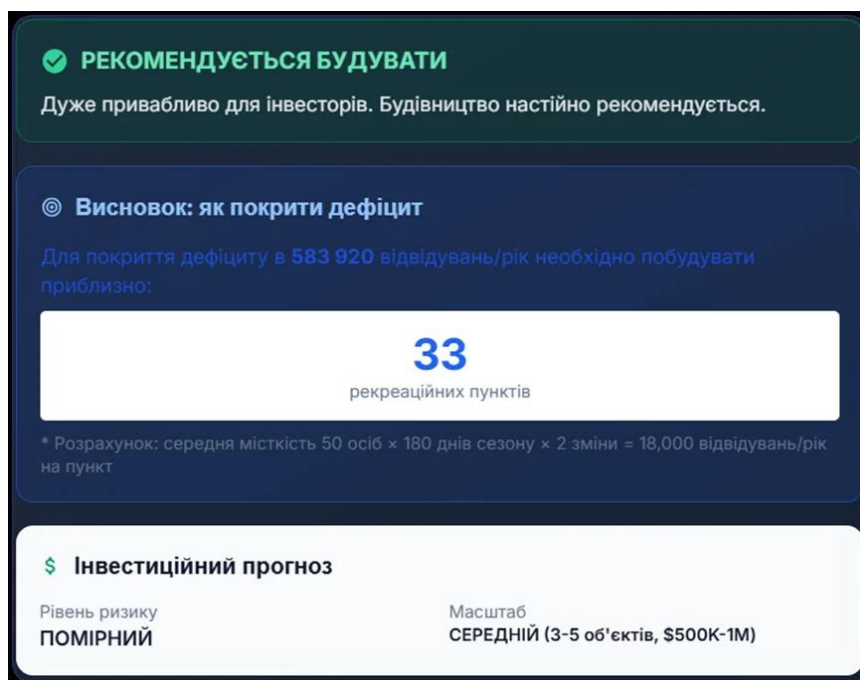


Рисунок В.4 – Інвестиційний прогноз для обраної області

Таблиця В.4 – Результати аналізу областей України

№	Область	Бал	Ключові фактори
1	Київська	78.5	Максимальний попит, потужні ПЗФ, відмінна інфраструктура
2	Львівська	76.2	Культурний центр, відмінна транспортна доступність
3	Івано-Франківська	74.8	Карпати, НПП, високі природні умови
4	Закарпатська	72.3	Унікальна природа, гірськолижні курорти
5	Одеська	70.1	Приморський регіон, високий попит
6	Дніпропетровська	67.4	Велике населення, хороша інфраструктура
7	Харківська	65.9	Другий за населенням центр, розвинена інфраструктура
8	Черкаська	63.7	Дніпровський регіон, баланс факторів
9	Волинська	62.5	Озерний край, добрі природні умови
10	Чернівецька	61.8	Гірський регіон, культурна спадщина

Лістинг В.1 – Узагальнений фрагмент коду реалізації інтегральної оцінки методом зваженої суми балів

```
def calculate_total_score(factors: dict, weights: dict) -> float:
    """
    Обчислення інтегрального показника рекреаційного потенціалу
    методом зваженої суми балів.
    """
    total_score = 0.0

    for factor, value in factors.items():
        weight = weights.get(factor, 0.0)
        total_score += value * weight
```

```
# Обмеження діапазону значень (0–90 балів)
total_score = max(0.0, min(total_score, 90.0))
```

```
return round(total_score, 2)
```

Лістинг В.2 – Узагальнений фрагмент коду реалізації інтегральної оцінки
методом зваженої суми балів

```
import numpy as np
from sklearn.cluster import DBSCAN

def detect_fire_clusters(coordinates):
    """
    Виявлення просторових кластерів антропогенних лісових пожеж
    з використанням алгоритму DBSCAN.
    """
    # Перетворення координат у радіани
    coords_rad = np.radians(coordinates)

    dbscan = DBSCAN(
        eps=10 / 6371,    # радіус 10 км з урахуванням радіуса Землі
        min_samples=3,
        metric="haversine"
    )

    labels = dbscan.fit_predict(coords_rad)
    return labels
```

Лістинг В.3 – Узагальнений фрагмент коду взаємодії клієнтської частини з
REST API

```
import { useEffect, useState } from "react";

function useRegionAnalysis(selectedRegion) {
  const [analysis, setAnalysis] = useState(null);

  useEffect(() => {
    if (!selectedRegion) return;

    fetch(`/api/analyze/${selectedRegion}`)
      .then(response => response.json())
      .then(data => setAnalysis(data))
      .catch(error => console.error("API error:", error));
  }, [selectedRegion]);

  return analysis;
}

export default useRegionAnalysis;
```