

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерних наук
(повна назва)
Кафедра _____ Штучного інтелекту
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)

Інтелектуальна система «TERRACALM» для психосоціальної адаптації
в умовах урбанізованого середовища
(тема)

Виконав:
здобувач _____ четвертого _____ року навчання,
групи _____ ІТШІ-22-1

_____ Вероніка ВІНОГРАДСЬКА
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-професійна

Освітня програма _____ Штучний інтелект

(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ проф. Лариса ЧАЛА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ШІ

(підпис)

_____ Лариса ЧАЛА
(власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерних наук _____
Кафедра _____ Штучного інтелекту _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність _____ 122 Комп'ютерні науки _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Штучний інтелект _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Виноградській Вероніці Геннадіївні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Інтелектуальна система «TERRACALM» для психосоціальної адаптації в умовах урбанізованого середовища _____

затверджена наказом університету від 5 червня 2026 р. № 488Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 9 липня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи наукові публікації з терапевтичної урбаністики, багатокритеріального аналізу (MCDA) та NLP; документація мови Python (FastAPI, Stanza) і веб-технологій (React, Leaflet); відкриті геодані OpenStreetMap; текстові набори користувацьких запитів; алгоритми просторової індексації, векторного моделювання та пояснювального ШІ (Explainable AI).

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) Аналіз предметної галузі та постановка задачі дослідження

2) Концептуальне проєктування архітектури та обґрунтування технологічних механізмів системи

3) Математична модель та архітектура системи семантичного ранжування

4) Реалізація інтелектуальної системи Terracalm

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	08.06.2026	виконано
2	Аналіз предметної галузі та концепції Urban Health	10.06.2026	виконано
3	Огляд методів обробки природної мови та багатокритеріального аналізу	12.06.2026	виконано
4	Вибір технологій та інструментів розробки системи	13.06.2026	виконано
5	Проектування архітектури системи «TerraCalm» та структури бази даних	18.06.2026	виконано
6	Розробка математичної моделі ранжування локацій та векторного простору	20.06.2026	виконано
7	Реалізація MVP-прототипу веб-застосунку	26.06.2026	виконано
8	Тестування інтелектуальної системи	28.06.2026	виконано
9	Написання пояснювальної записки	30.06.2026	виконано
10	Перевірка на академічний плагіат	02.07.2026	виконано
11	Нормоконтроль	04.07.2026	виконано
12	Підготовка презентації та доповіді	05.07.2026	виконано
13	Попередній захист	06.07.2026	виконано
14	Рецензування	07.07.2026	виконано
15	Захист перед ЕК	09.07.2026	

Дата видачі завдання 8 червня 2026 р.

Здобувач 
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Лариса ЧАЛА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 100 с., 25 рис., 4 табл., 1 дод., 20 джерел.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА, МЕНТАЛЬНЕ ЗДОРОВ'Я, ОБРОБКА ПРИРОДНОЇ МОВИ, РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ, EXPLAINABLE AI, JAVASCRIPT, NLP, PRIVACY BY DESIGN, REACT, SPA, URBAN HEALTH.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційної взаємодії людини з міським середовищем у контексті психологічної адаптації та відновлення.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційні технології інтелектуального аналізу геопросторових даних для створення персоналізованих рекомендаційних систем у сфері ментального здоров'я.

Метою роботи є розробка та реалізація інтелектуального веб-застосунку «TerraCalm» для персоналізованого пошуку та рекомендації відновлювальних міських просторів з використанням методів багатокритеріального ранжування та обробки природної мови.

У роботі використовуються методи багатокритеріального аналізу (MCDA) для обчислення релевантності локацій, методи обробки природної мови (NLP) для семантичного аналізу користувацьких скарг, методи просторового моделювання (R-Tree індексація), а також сучасні методи проєктування програмного забезпечення. Технічна реалізація включає розробку односторінкового веб-застосунку (SPA) мовою JavaScript, використання бібліотеки React 18 для побудови компонентного графічного інтерфейсу, інтеграцію рушія Leaflet для інтерактивної картографічної візуалізації, розробку модуля пояснювального штучного інтелекту (XAI) та NLP-конвеєра, а також використання Web Storage API (localStorage) для безпечного збереження даних на стороні клієнта.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 100 pp., 25 fig., 4 tabl., 1 ann., 20 references.

EXPLAINABLE AI, INTELLIGENT SYSTEM, JAVASCRIPT, MENTAL HEALTH, MULTI-CRITERIA ANALYSIS, NATURAL LANGUAGE PROCESSING, NLP, PRIVACY BY DESIGN, REACT, RECOMMENDATION ALGORITHM, SPA, URBAN HEALTH.

The object of the research is the process of human information interaction with the urban environment in the context of psychological adaptation and recovery.

The subject of the research is the methods, models, and information technologies of intelligent spatial data analysis for creating personalized recommendation systems in the field of mental health.

The purpose of the work is the development and implementation of the intelligent web-application «TerraCalm» for the personalized search and recommendation of restorative urban spaces using multi-criteria ranking and natural language processing methods.

The research employs multi-criteria decision analysis (MCDA) methods to calculate the relevance of locations, natural language processing (NLP) methods for the semantic analysis of user queries, spatial modeling methods (R-Tree indexing), as well as modern software engineering methods.

The technical implementation includes the development of a Single-Page Application (SPA) in JavaScript, the use of the React 18 library to build a component-based graphical user interface, the integration of the Leaflet engine for interactive cartographic visualization, the development of an Explainable AI (XAI) module and an NLP pipeline, as well as the use of the Web Storage API (localStorage) for secure data storage on the client side.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз предметної галузі та постановка задачі дослідження	10
1.1 Опис предметної галузі: війна, урбаністика та ментальне здоров'я нації	10
1.1.1 Масштаб проблеми та прогнози	10
1.1.2 Концепція Urban Health в умовах війни та феномен «ворожої архітектури»	12
1.1.3 Біофілія як ресурс відновлення	14
1.1.4 Актуальність розробки системи	15
1.2 Проблеми та виклики психологічної адаптації населення	16
1.2.1 Проблема сенсорного перевантаження та ретравматизації.....	16
1.2.2 Втрата «третього місця» та соціальна дезадаптація ВПО	18
1.2.3 «Парадокс цифрової терапії» та виснаження его	19
1.3 Огляд та критичний аналіз існуючих рішень.....	20
1.4 Інноваційність та наукове підґрунтя системи TerraCalm	22
1.4.1 Теоретична база.....	22
1.4.2 Технологічна інновація: гібридний просторовий інтелект	24
1.5 Постановка задачі дослідження.....	25
2 Концептуальне проектування архітектури та обґрунтування технологічних механізмів системи.....	27
2.1 Методологія збору геопросторових даних та порівняльний аналіз картографічних платформ	27
2.2 Концепція гібридної архітектури та дворівневої обробки даних	29
2.3 Інженерна реалізація механізму «Активного радіуса» та архітектура буферів оперативної пам'яті.....	31
2.4 Проектування динамічної бази даних та вибір СУБД для Edge AI ..	32
2.5 Алгоритми інтелектуального очищення кешу та життєвого циклу даних	35

2.6 Асинхронний NLP-аналіз відгуків та збагачення паспортів локацій	37
2.7 Обґрунтування технологічного стеку та середовища розробки	39
2.8 Механізм забезпечення конфіденційності та анонімізації даних	43
3 Математична модель та архітектура системи семантичного ранжування	46
3.1 Концептуальна парадигма та формалізація предметної області.....	46
3.2 Багатовимірна векторна модель локації	46
3.3 Ключові аналітичні функції системи	48
3.4 Матриця вагових коефіцієнтів для цільових груп.....	50
3.5 Алгоритмічне забезпечення системи	53
3.6 Модуль генерації пояснень (Explainable AI)	59
3.7 Алгоритмічна анонімізація та математична обфускація геоданих...	61
4 Реалізація інтелектуальної системи Terracalm.....	65
4.1 Вибір технологій та програмних засобів	65
4.2 Реалізація архітектури системи	67
4.3 Реалізація модуля аналізу потреб користувача.....	72
4.4 Реалізація механізму рекомендацій	75
4.5 Реалізація клієнтського шару персистентності даних	79
4.6 Реалізація користувацького інтерфейсу	83
4.7 Підсистема адміністрування та візуалізація векторних даних.....	87
4.8 Тестування та результати роботи системи	90
Висновки	95
Перелік джерел посилання	97
Додаток А Відомість кваліфікаційної роботи	100

ВСТУП

Міське середовище є одним із ключових чинників, що визначають стан психічного здоров'я людини. В умовах тривалого збройного конфлікту в Україні ця залежність набуває особливої гостроти: для ветеранів із симптомами бойового стресу, внутрішньо переміщених осіб та інших вразливих груп неадаптований міський простір стає джерелом додаткового психоемоційного навантаження. Акустичне забруднення, висока щільність інфраструктури та постійний інформаційний потік ускладнюють процеси ресоціалізації та самостійного відновлення.

Наявні цифрові інструменти вирішують цю проблему лише частково. Міські навігаційні сервіси орієнтуються на популярність і комерційну привабливість об'єктів, не враховуючи психоемоційного контексту простору. Застосунки для підтримання ментального здоров'я здебільшого функціонують у режимі реакції на запит і не пов'язані з реальним геопросторовим оточенням користувача. Таким чином, утворюється незайнята ніша – персоналізованої просторової навігації, що враховує індивідуальний психологічний профіль.

Актуальність роботи визначається кількома взаємопов'язаними обставинами. Зростання кількості людей із травматичним досвідом в Україні підвищує суспільний попит на доступні інструменти просторової самодопомоги. Розвиток методів семантичного аналізу та периферійних обчислень робить можливою реалізацію складних персоналізованих рекомендаційних систем із захистом геоданих. Комплексні рішення, що поєднують картографічні метадані з індивідуальним психологічним профілем, на цифровому ринку практично відсутні.

Для досягнення мети роботи було поставлено такі основні задачі:

– провести аналіз існуючих підходів до міської навігації та цифрових інструментів підтримання ментального здоров'я;

- розробити математичну модель семантичного ранжування геопросторових об'єктів на основі векторного представлення психологічних потреб користувача;
- спроектувати архітектуру рекомендаційної системи з модулем пояснюваного штучного інтелекту (XAI);
- реалізувати функціональний прототип системи «TerraCalm»;
- верифікувати коректність роботи алгоритму на тестовій вибірці запитів.

Результати виконання зазначених задач відображено у відповідних розділах роботи та підтверджено практичним тестуванням розробленого прототипу.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Опис предметної галузі: війна, урбаністика та ментальне здоров'я нації

Сучасні виклики, пов'язані з тривалим воєнним конфліктом в Україні, зумовлюють виокремлення психологічної реабілітації та соціальної адаптації населення у самостійний науково-практичний пріоритет. Пролонгований стресогенний вплив на суспільство визначає критичний масштаб медико-соціальних наслідків, що є одним із найбільших у Європі за останні десятиліття. Комплексний характер об'єкта аналізу вимагає застосування міждисциплінарного підходу. Ця робота синтезує інструменти клінічної психології (зокрема психотравматології), цифрові технології підтримки психічного здоров'я (e-Mental Health) та концепції урбаністики в частині оцінювання впливу просторових параметрів міського середовища на психоемоційний стан людини.

1.1.1 Масштаб проблеми та прогнози

Згідно з останніми аналітичними звітами та довгостроковими прогнозами Міністерства охорони здоров'я України, а також оцінками міжнародних експертів Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), масштаби потреби у психологічній допомозі є надзвичайно значними: очікується, що підтримки потребуватимуть понад 15 мільйонів громадян України [1]. Ця кількість охоплює широкий спектр населення: від безпосередніх учасників бойових дій (військовослужбовців та ветеранів) до цивільних осіб, які перебували в зонах активних обстрілів, пережили окупацію або були змушені залишити свої домівки, ставши внутрішньо переміщеними особами (ВПО).

При цьому фахівці у сфері психічного здоров'я вказують на латентний характер феномену «відтермінованої травми». Клінічні симптоми серйозних розладів, таких як посттравматичний стресовий розлад (ПТСР), генералізовані тривожні розлади та важкі форми депресії, часто виникають не одразу після травматичної події. Пік звернень може настати через 6–12 місяців або навіть кілька років після завершення гострої фази стресу, коли компенсаторні ресурси психіки вичерпуються [2].

Така ситуація створює загрозу критичного, довгострокового навантаження на національну систему охорони здоров'я. Аналіз свідчить про те, що цей виклик неможливо буде покрити виключно наявним людським ресурсом кваліфікованих психотерапевтів та психіатрів, кількість яких є обмеженою. Це зумовлює нагальну потребу у розробці масштабованих цифрових інструментів превенції та самодопомоги, які можуть виступити першим рівнем системи психологічної підтримки населення. Особливу роль у цій екосистемі превентивних заходів відіграє взаємодія людини з її безпосереднім оточенням. Цифрові рішення мають бути органічно інтегровані у повсякденний міський простір, мінімізуючи стигматизацію процесу психологічної реабілітації. Замість виключно клінічної терапії, на ранніх етапах фокус зміщується на доступні просторові практики, які допомагають людині автономно знизити базовий рівень сенсорного навантаження. Відповідно, інформаційна та архітектурна адаптивність міського середовища є вагомим фактором ресоціалізації осіб із травматичним досвідом.

Як свідчить міжнародна статистика (рисунок 1.1), ігнорування симптомів бойового стресу має критичні наслідки. Значна частина втрат серед військовослужбовців у довгостроковій перспективі пов'язана не з прямими бойовими діями, а з наслідками нелікованого ПТСР, який призводить до стійкої втрати працездатності та соціальної дієздатності, внаслідок чого зростає ризик суїцидальної поведінки [2], [3]. Наведені дані

обґрунтовують доцільність створення доступних інструментів превенції для міського середовища.

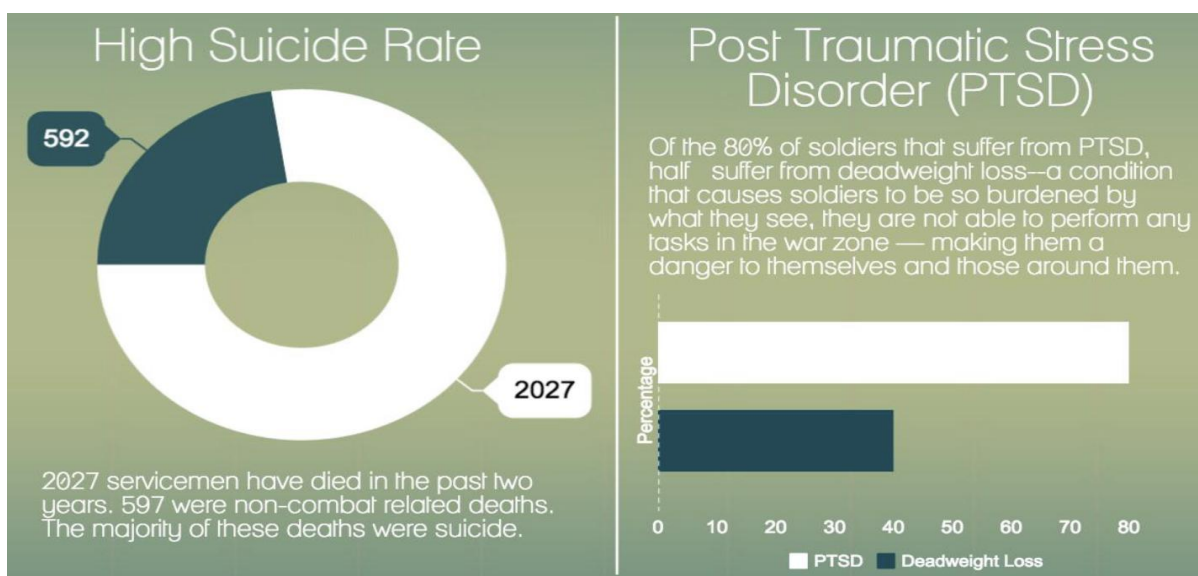


Рисунок 1.1 – Статистика наслідків бойового стресу: співвідношення випадків ПТСР та ризику суїциду серед військовослужбовців за відсутності своєчасної реабілітації [3]

Однією з ключових умов формування стійкого відновлювального середовища є якість міського простору, в якому перебуває людина. Аналіз концепції Urban Health дозволяє зрозуміти механізми впливу архітектурного середовища на перебіг відновлення.

1.1.2 Концепція Urban Health в умовах війни та феномен «ворожої архітектури»

Суміжним напрямом дослідження є концепція Urban Health, яка розглядає міське середовище як екосистему, що впливає на фізичне та психічне здоров'я мешканців. Сучасне урбанізоване середовище, навіть у мирний час, часто виступає джерелом хронічного стресу через поєднання різноманітних негативних факторів. Акустичне забруднення (постійний

транспортний шум, гул вентиляційних систем, звуки будівництва), візуальний хаос (надмірна реклама, одноманітна архітектура, відсутність природних кольорів), висока щільність населення, що призводить до порушення особистого простору, та відсутність достатньої кількості приватних зон формують так званий «міський штраф» (urban penalty) для ментального здоров'я. Цей феномен проявляється у підвищеному ризику розвитку тривожних розладів, депресії та синдрому емоційного вигорання серед містян порівняно з жителями сільської місцевості.

В умовах повномасштабної війни український міський простір зазнає ще більш суттєвої трансформації, перетворюючись із відносно нейтрального фону повсякденного життя на джерело потенційної, а іноді й реальної загрози. Звичні елементи міста набувають нового, часто травматичного значення, стаючи потужними тригерами для психіки. Різкі звуки, такі як раптовий гучний звук зачинення дверей, вихлоп автомобіля чи гул літака, миттєво асоціюються з вибухами або наближенням ворожої авіації, викликаючи фізіологічну реакцію «бий або біжи». Скупчення людей у метро, торгових центрах чи на вокзалах викликають підсвідомий страх через неможливість швидкої евакуації та вразливість перед потенційними атаками. Зміна топографії міст через руйнування будівель, появу блокпостів та протитанкових їжаків дезорієнтує та посилює відчуття небезпеки. Цей вплив є більш вираженим для внутрішньо переміщених осіб (ВПО), для яких нове місто є незнайомим середовищем без звичних просторових орієнтирів та об'єктів, асоційованих із безпекою, що значно ускладнює процес їхньої адаптації та відновлення [4].

Окремим фактором, що критично посилює когнітивне навантаження на ці вразливі групи населення, є феномен так званої «ворожої архітектури» (Hostile Architecture) або «захисного дизайну». У класичній світовій урбаністиці під цим терміном розуміють елементи міського середовища, навмисно спроектовані для обмеження певної поведінки: лавки з металевими перегородками, які унеможливають лежання; шипи на

підвіконнях та парапетах; відсутність тіньових навісів або свідомо незручні вузькі сидіння на зупинках громадського транспорту.

Проте в умовах поствоєнного відновлення України концепція «ворожої архітектури» набуває значно ширшого змісту. Міський простір часто стає ненавмисно ворожим та ексклюзивним (виключаючим) для нової демографічної групи, що суттєво збільшилась внаслідок бойових дій: ветеранів з ампутаціями, людей з наслідками мінно-вибухових травм, а також осіб із важкими формами ПТСР та сенсорного перевантаження [5]. Для людини з травматичним досвідом або обмеженою мобільністю відсутність доступних «зон перепочинку» перетворює звичайне пересування містом – на процес із підвищеним когнітивним навантаженням.

З точки зору нейробіології, навігація у такому неадаптованому середовищі вимагає від людини значних витрат когнітивного ресурсу на постійний контроль ситуації та утримання рівноваги. Згідно з теорією виснаження его, це призводить до швидкого вичерпання когнітивного ресурсу та здатності до саморегуляції емоцій. Відповідно, коли людина стикається навіть із незначним тригером (наприклад, гучним звуком сирени чи натовпом), її нервова система вже не має компенсаторного ресурсу для адекватної реакції, що провокує панічні атаки, агресію та подальшу ретравматизацію.

Таким чином, сучасне українське міське середовище сприяє соціальній ізоляції вразливих груп населення, посилюючи бар'єри для їх реінтеграції. Отже, розробка інтелектуальних навігаційних систем є доцільним напрямом досліджень.

1.1.3 Біофілія як ресурс відновлення

Водночас фундаментальним теоретичним підґрунтям дослідження є гіпотеза біофілії (Biophilia Hypothesis), сформульована соціобіологом Е.О. Вілсоном. Згідно з цією концепцією, людина має еволюційно закріплену,

вроджену потребу в емоційному зв'язку з іншими живими системами [6]. Це прагнення є не просто естетичною перевагою, а біологічною необхідністю, сформованою тисячоліттями еволюції у природному середовищі.

Зокрема, дослідження Park et al. (2010) зафіксувало зниження рівня кортизолу на 13,4% та нормалізацію артеріального тиску після 15-хвилинної прогулянки лісом порівняно з міським середовищем [7]. Відповідно до теорії ART, природне середовище також сприяє відновленню концентрації уваги [8]. Проте в умовах сучасної хаотичної урбанізації, щільної забудови та постійного інформаційного шуму цей природний механізм саморегуляції блокується, що асоціюється зі зростанням поширеності психосоматичних розладів.

1.1.4 Актуальність розробки системи

На підставі проведеного аналізу встановлено, що існує потреба у створенні доступного технологічного інструменту, який сприятиме використанню природних рекреаційних ресурсів міста для психоемоційного відновлення.

Запропонована система використовує існуючі елементи міської інфраструктури (паркові зони, набережні, пішохідні вулиці) як ресурс для психоемоційного відновлення, виконуючи функцію інформаційного посередника між користувачем та середовищем.

Методологія системи ґрунтується на принципах доказової медицини та застосовує методи обробки природної мови для автоматизації оцінки характеристик міського середовища. Формалізація критеріїв підбору рекреаційних локацій дозволяє перейти від суб'єктивного вибору до алгоритмічного ранжування на основі визначених параметрів середовища. У результаті досягається оптимізація процесів психологічної реабілітації та соціальної адаптації суб'єкта.

1.2 Проблеми та виклики психологічної адаптації населення

Детальний аналіз проблематики дозволив виявити низку критичних бар'єрів фізіологічного, соціального та когнітивного характеру, які перешкоджають ефективному відновленню населення.

Цільовою аудиторією системи визначено три основні групи:

- ветерани та демобілізовані військовослужбовці з проявами бойового стресу або ПТСР;
- внутрішньо переміщені особи (ВПО), які потребують адаптації у новому міському середовищі;
- цивільні особи в стані хронічного стресу або емоційного вигорання.

Кожна група має специфічні потреби, які враховуються алгоритмом персоналізації (детально описано в розділі 3).

1.2.1 Проблема сенсорного перевантаження та ретравматизації

Для ветеранів, що повертаються до цивільного життя, та цивільних осіб із травматичним досвідом характерний стійкий стан гіпервігильності (надмірної пильності). У цьому стані нервова система постійно сканує середовище з метою виявлення потенційних загроз, не маючи можливості перейти в режим розслаблення. Елементи міської інфраструктури стають джерелами додаткового сенсорного навантаження:

- акустичні тригери. Місто насичене різкими, непередбачуваними звуками (гул мотоциклів, хлопання дверима, сирени, ремонтні роботи), які миттєво активують реакцію «бий або біжи», що викликає панічні атаки або агресію;
- візуальні та просторові тригери. Скупчення людей (ефект натовпу) сприймається як загроза через неможливість контролювати «периметр» особистої безпеки. Хаотична візуальна реклама та інтенсивний трафік виснажують і без того обмежений ресурс уваги;

– відсутність «зон безпеки». У незнайомому районі людина не володіє ментальною картою місцевості. Вона не знає, де можна швидко знайти укриття, де є тихий двір, щоб перевести подих, або просто лавка, віддалена від проїжджої частини.

Як наслідок, постійне перебування у стані сенсорної оборони виснажує нервову систему та змушує людину уникати міських просторів, що призводить до глибокої соціальної ізоляції. Цей процес формує замкнене коло ретравматизації (рисунок 1.2).

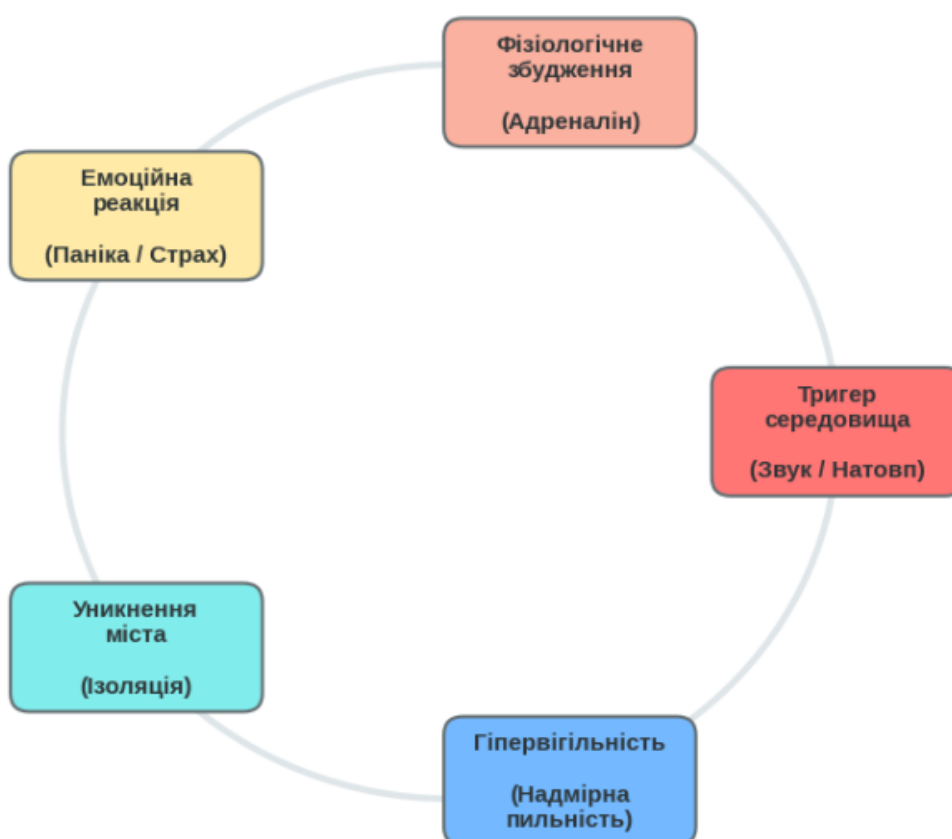


Рисунок 1.2 – Цикл ретравматизації у неадаптованому міському середовищі: від сенсорного тригера до соціальної ізоляції (джерело: розроблено автором)

Аналіз наведеної схеми (рисунок 1.2) унаочнює, що деструктивний вплив неадаптованого міського середовища має системний та циклічний

характер. Повторюваний вплив тригерних стимулів поглиблює загальну дезадаптацію, формуючи циклічну залежність між стресовою реакцією та просторовою ізоляцією. Таким чином, ефективно розірвати цей деструктивний цикл можливо лише шляхом інтелектуального керування маршрутами та надання користувачеві превентивних даних про безпечні відновлювальні локації, що й зумовлює необхідність розробки архітектурних рішень системи «TerraCalm».

1.2.2 Втрата «третього місця» та соціальна дезадаптація ВПО

Американський соціолог Рей Ольденбург у праці «The Great Good Place» (1989) ввів поняття «третього місця» (Third Place) – нейтрального простору поза домом («перше місце») і роботою («друге місце»), де відбувається неформальна соціалізація, комунікація та психологічне розвантаження. До таких місць належать кав'ярні, бібліотеки, парки, сквери, громадські центри та набережні [9]. Саме наявність доступних і комфортних «третіх місць» є критично важливим фактором для формування почуття належності до спільноти, зниження рівня соціальної тривожності та підтримки ментального здоров'я.

Для внутрішньо переміщених осіб (ВПО) вимушений переїзд означає травматичну втрату не лише житла, а й усієї роками сформованої мережі звичних «третіх місць». Вони опиняються у своєрідному соціальному вакуумі: втрачається відчуття «свого» безпечного простору, зникають звичні маршрути для відновлення, а незнайоме міське середовище часто сприймається як вороже або небезпечне. Проблема полягає у відсутності ефективного методу для швидкого пошуку нових «своїх» місць – локацій, які б відповідали індивідуальним, часто специфічним потребам у безпеці, затишку та соціалізації (наприклад, наявність укриття поруч, відсутність гучних звуків, інклюзивність). Цей дефіцит інформації створює бар'єр для інтеграції в нову громаду, посилює відчуття ізоляції та маргіналізації, що є

прямим фактором ризику для розвитку депресивних станів. Тому створення цифрового інструменту для навігації з урахуванням психоемоційних параметрів міського простору є актуальним завданням для соціальної адаптації переселенців.

1.2.3 «Парадокс цифрової терапії» та виснаження его

Сучасний ринок e-Mental Health застосунків пропонує безліч практик для самодопомоги (медитації, щоденники, трекери настрою), але їхня ефективність часто знецінюється феноменом, який дослідники називають «парадоксом цифрової терапії». Згідно з теорією виснаження его (Ego Depletion) Роя Баумейстера, сила волі та здатність до самоконтролю є вичерпними когнітивними ресурсами, які витрачаються на ухвалення рішень, регуляцію емоцій і концентрацію уваги [10].

Людина, що перебуває у стані хронічного стресу або переживає наслідки психотравми, часто має критично низький рівень цього ресурсу. Більшість існуючих застосунків вимагає від користувача активних вольових зусиль: відкрити програму саме в момент кризи, чесно зафіксувати свій настрій, сконцентруватися на виконанні дихальних вправ або медитації. Це створює додаткове когнітивне навантаження саме тоді, коли у людини немає на це сил. Такий реактивний підхід (реагування на кризовий стан) не лише не запобігає проблемі, а й може посилювати стрес через почуття провини за «невиконання плану» самодопомоги. Більше того, сам смартфон часто асоціюється з джерелом тривоги (новини про війну, сповіщення про повітряні тривоги), тому спроба використовувати мобільний застосунок як терапевтичний інструмент може бути контрпродуктивною.

Ефективніший підхід передбачає формування відновлювального середовища до настання кризи, зокрема через пропонування сценаріїв відновлення (прогулянки тихими парковими зонами), що не потребують від

користувача постійного самомоніторингу, а використовують механізми пасивного відновлення уваги через контакт із природним оточенням [11].

1.3 Огляд та критичний аналіз існуючих рішень

На ринку мобільних застосунків представлена значна кількість рішень, дотичних до тематики ментального здоров'я.

Нижче проводиться детальний порівняльний аналіз за категоріями, щоб виявити їхні обмеження.

Першу категорію становлять навігаційні та картографічні сервіси (Google Maps, TripAdvisor). Ці системи займають домінуючу позицію на ринку картографічних сервісів за кількістю користувачів.

Алгоритм: Оптимізація пошуку відбувається за критеріями популярності, рейтингу відвідувачів або комерційної привабливості.

Недолік: для цільової аудиторії TerraCalm (ветерани, люди з тривожністю) «популярне» місце часто означає «небезпечне» (шумне, переповнене людьми). Існуючі карти не мають шару «психологічних даних»: рівня акустичного комфорту, приватності, наявності зон для усамітнення.

Другу категорію становлять застосунки для медитації та когнітивно-поведінкової терапії (КПТ). Цей сегмент є найбільш чисельним на ринку цифрових рішень для підтримання ментального здоров'я, а його методологічну основу складають практики усвідомленості (майндфулнесу, mindfulness) та базові психотерапевтичні методики.

Недолік: реактивність та ізоляція. Користувач звертається до них, коли кризовий стан вже настав. Крім того, вони вимагають сенсорної ізоляції від світу, що може бути небезпечним або дискомфортним у міському середовищі.

Третя категорія охоплює спеціалізовані застосунки для роботи з травмою (PTSD Coach, «База»), розроблені професійними

інституціями (Департаментом у справах ветеранів США, українськими волонтерськими ініціативами).

Функціонал: скринінг симптомів, кнопки екстреної допомоги, освітні матеріали про природу травми.

Недолік: вони є ефективними інструментами клінічної підтримки або самодіагностики, але не інструментами соціальної адаптації. Вони допомагають упоратися з нападом паніки, коли він уже стався, але не пропонують інструментів для побудови безпечного способу життя.

Для наочної демонстрації та ідентифікації унікальної функціональної ніші, яку займає розроблене рішення порівняно з існуючими комерційними та клінічними аналогами, було проведено комплексний зведений аналіз за критеріями проактивності, урахування просторових тригерів, автономності та наявності інструментів пояснювального штучного інтелекту (рисунок 1.3).

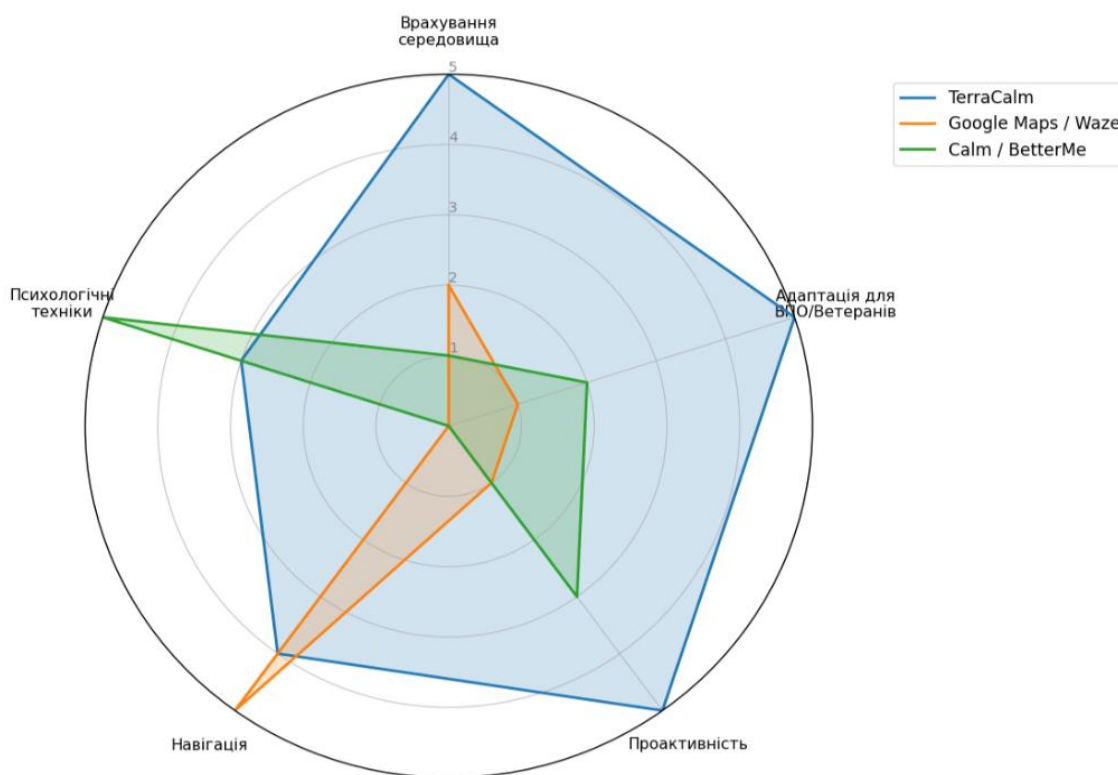


Рисунок 1.3 – Конкурентний аналіз функціонального профілю систем (джерело: розроблено автором)

Отже, наразі відсутній комплексний застосунок, який поєднав би точні геопросторові дані з профілем довгострокових психологічних потреб користувача для проактивної побудови відновлювального середовища. Зазначений дефіцит функціональності обґрунтовує доцільність розробки інтелектуальної системи «TerraCalm», архітектура якої описана у розділі 2.

1.4 Інноваційність та наукове підґрунтя системи TerraCalm

В основу системи покладено профілактичний підхід: замість реагування на симптоми стресу система орієнтована на формування відновлювального середовища. Науковим фундаментом розробки є дві ключові теорії екологічної психології, які пояснюють механізми впливу навколишнього середовища на мозок людини.

1.4.1 Теоретична база

Першим фундаментом є Теорія відновлення уваги (Attention Restoration Theory, ART), розроблена психологами Р. та С. Каплан [8]. Теорія стверджує, що сучасне міське життя вимагає постійного використання «спрямованої уваги» (directed attention) для фільтрації інформаційного шуму та виконання завдань. Цей ресурс є обмеженим і швидко вичерпується, що призводить до когнітивної втоми, дратівливості та помилок. Природа ж, завдяки своїм фрактальним структурам та динаміці, активує «мимовільну увагу» (involuntary attention) або стан «м'якої зачарованості», що дозволяє ресурсу спрямованої уваги відновитися природним шляхом.

Іншим теоретичним фундаментом є Теорія зниження стресу (Stress Reduction Theory, SRT) Р. Ульріха [12]. Вона описує механізм емоційної відповіді на природні пейзажі: перебування у природному середовищі активує парасимпатичну нервову систему, знижуючи артеріальний тиск та

рівень кортизолу. Окремо дослідження Taylor et al. (2005) пов'язують позитивний ефект природного середовища з фрактальною структурою рослинних патернів [13]. При візуальному контакті з такими об'єктами автоматично активується парасимпатична нервова система, що призводить до зниження артеріального тиску, рівня кортизолу та м'язового напруження вже протягом перших хвилин перебування у середовищі.

Механізм когнітивного відновлення, який покладено в алгоритмічне ядро системи TerraCalm, базується на концептуальній моделі Теорії відновлення уваги (ART) (рисунок 1.4).

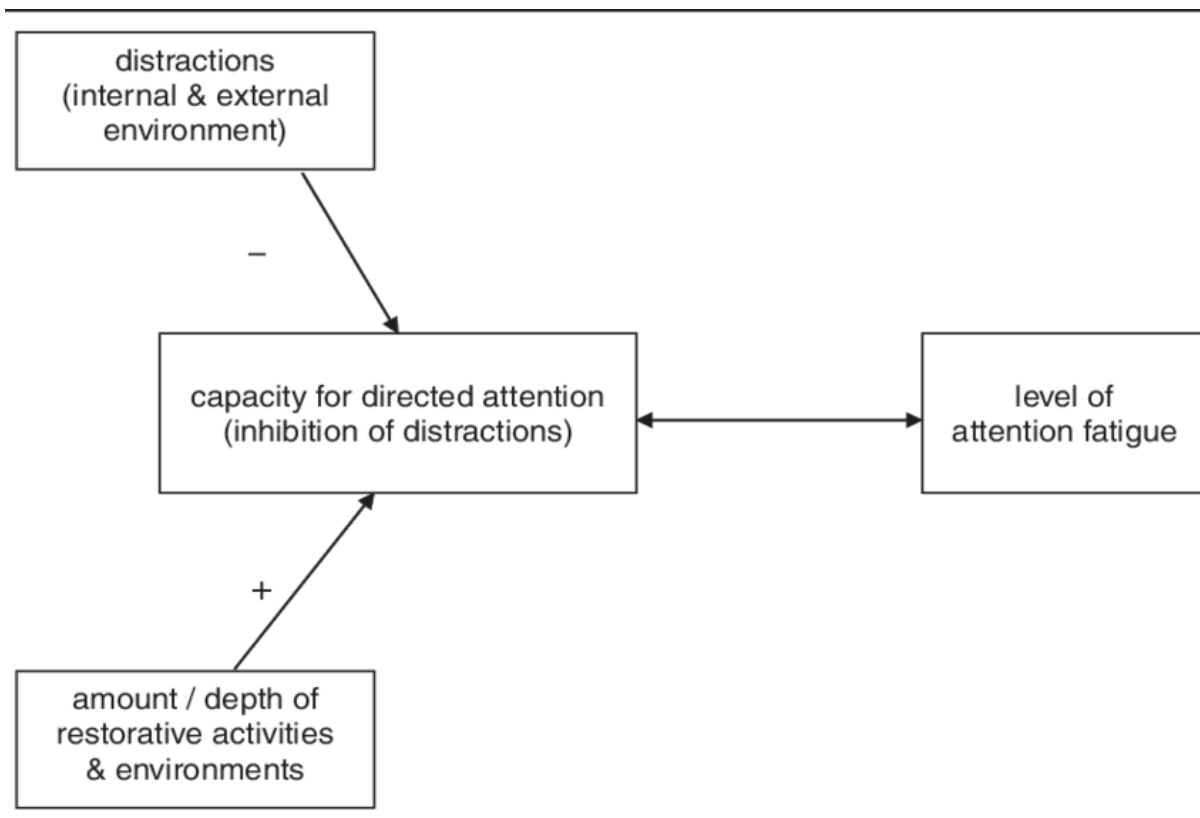


Рисунок 1.4 – Схема механізму виснаження та відновлення когнітивного ресурсу згідно з теорією ART (адаптовано з Kaplan, 1995)

Як видно з рисунку 1.4, ключовим вузлом є блок «здатність до спрямованої уваги» (Capacity for Directed Attention). У міському середовищі цей ресурс постійно витрачається на пригнічення (інгібіцію)

«відволікаючих факторів» (Distractions) – шуму, реклами, руху транспорту. Коли ресурс вичерпується, настає стан «втоми уваги» (Attention Fatigue), що проявляється у дратівливості та помилках. Система TerraCalm, базуючись на цій схемі, шукає локації, які діють як позитивний вхідний сигнал («Restorative Environments»), поповнюючи резервуар уваги та розриваючи цикл втоми.

1.4.2 Технологічна інновація: Гібридний просторовий інтелект

TerraCalm пропонує концепцію, яку можна визначити як «гібридний просторовий інтелект». Вона включає три компоненти.

По-перше, це семантичний аналіз простору. Використання методів NLP (обробки природної мови) для аналізу текстових метаданих карт та відгуків про локації. Система оцінює об'єкти не за комерційною привабливістю («смачна кава»), а за психологічними маркерами: «затишно», «тихо», «багато зелені», «безпечно», «спів птахів».

Наступна компонента – модуль персоналізованого пошуку локацій (Smart Spot Finder) – компонент системи, що здійснює ранжування локацій за індивідуальним профілем користувача. Алгоритм підбору місць враховує не відстань, а індивідуальний профіль довгострокових потреб користувача. Наприклад, для ветерана пріоритетом буде «відсутність натовпу» та «акустичний комфорт», а для матері з дитиною – «безпека» та «наявність тіні».

Третьою складовою є проактивний характер системи: замість реагування на наявні симптоми стресу, алгоритм орієнтований на формування превентивних сценаріїв відновлення. Це допомагає користувачеві сформувати нові звички (наприклад, регулярне відвідування певного тихого скверу), які діють як превентивний захід проти вигорання та соціальної ізоляції.

1.5 Постановка задачі дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів оцінки міського середовища та розробка інтелектуальної системи «TerraCalm» для персоналізованого пошуку та рекомендації відновлювальних локацій, спрямованої на покращення психоемоційного стану користувачів, профілактику вигорання та психосоціальну адаптацію в умовах поствоєнного відновлення України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні задачі:

а) провести системний аналіз факторів міського середовища (акустичних, візуальних, соціальних, інфраструктурних), що впливають на рівень стресу та когнітивного навантаження людини, та розробити математичну модель оцінки семантичної відповідності локацій потребам користувача (MatchScore) на основі методів багатокритеріального аналізу (MCDA);

б) розробити методи обробки, уніфікації та інтелектуальної інтерпретації гетерогенних просторово-семантичних даних для автоматизованого формування цифрових паспортів локацій та відновлення пропущених параметрів середовища методом контекстного аналізу текстових описів;

в) спроектувати архітектуру веб-застосунку, що забезпечує дворівневу обробку геопросторових запитів, підтримує концепцію вбудованої приватності (Privacy by Design) для захисту геолокації користувача та здатна функціонувати в автономному режимі за рахунок інкапсуляції обчислювальної логіки на стороні клієнта;

г) реалізувати MVP-прототип програмного забезпечення «TerraCalm» на базі сучасного веб-стеку, що включає три функціональні компоненти:

- модуль лінгвістичного аналізу та векторної адаптації – для токенизації, стемінгу текстових скарг користувача та трансформації необроблених просторових даних в уніфіковані 12-вимірні вектори;

- обчислювальне ядро адаптивного ранжування та картографічної візуалізації – для реалізації конвеєра лінійної згортки критеріїв, інтерактивного відображення просторів на карті та live-модифікації параметрів модератором;

- модуль пояснювальних рекомендацій (Explainable AI) – для генерації природномовних обґрунтувань вибору локацій та тригонометричної побудови радарних SVG-діаграм семантичної схожості векторів;

д) провести аналітичне та функціональне тестування розробленого прототипу шляхом емпіричної верифікації лінгвістичного ядра на базі складних психоемоційних запитів та комп'ютерного моделювання стрес-сценаріїв динамічної зміни параметрів міського середовища.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційної взаємодії людини з міським середовищем у контексті психологічної адаптації та відновлення. Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційні технології інтелектуального аналізу геопросторових даних для створення персоналізованих рекомендаційних систем у сфері ментального здоров'я.

2 КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕХАНІЗМІВ СИСТЕМИ

Другий розділ присвячено системному проєктуванню цільової виробничої архітектури системи «TerraCalm». Запропонована архітектура є результатом концептуального дослідження та становить технічну специфікацію повного промислового рішення, призначену для реалізації командою розробників у рамках подальшого розвитку проєкту. У межах кваліфікаційної роботи автором особисто спроектовано та обґрунтовано всі архітектурні рішення, наведені у цьому розділі. Верифікацію ключових алгоритмів – математичної моделі ранжування, NLP-конвеєру та модуля пояснювальних рекомендацій – виконано засобами MVP-прототипу, описаного у розділі 4, який реалізує обчислювальне ядро системи в середовищі браузера.

2.1 Методологія збору геопросторових даних та порівняльний аналіз картографічних платформ

Для формування «Цифрового Паспорта Локації» система має оперувати глибокими семантичними атрибутами міського середовища, що виходять за межі стандартних навігаційних метаданих. Вибір джерела геопросторових даних є визначальним для функціональності системи, оскільки традиційні комерційні картографічні сервіси проєктуються для вирішення задач маршрутизації та пошуку комерційних об'єктів. Унаслідок цього вони систематично ігнорують або агрегують мікрооб'єкти інфраструктури – лавки, окремі дерева, типи покриття доріжок, наявність навісів від дощу та освітлення у нічний час (таблиця 2.1), – які є ключовими параметрами для оцінки терапевтичного потенціалу простору в концепції Urban Health.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз джерел геопросторових даних для системи «TerraCalm»

	OpenStreetMap (OSM)	Google Maps API	Mapbox SDK
Доступ до вихідних тегів	Повний (через Overpass API)	Обмежений (лише POI)	Частковий (через Tiles)
Деталізація мікрооб'єктів	Висока (лавки, дерева, покриття)	Низька (переважно комерція)	Середня
Модель вартості	Безкоштовно (Open Source)	Платно (за кожен запит)	Платно (після ліміту)
Можливість офлайн-роботи	Повна підтримка форматів .pbk	Обмежена	Середня
Автономність даних	Можливість власного хостингу	Повна залежність від вендора	Залежність від вендора

Після детального аналізу потреб застосунку було обрано платформу OpenStreetMap (OSM), оскільки вона є єдиною, що дозволяє вилучати специфічні теги (наприклад, `surface=grass`, `denotation=landmark`, `lit=yes`), необхідні для розрахунку індексів відновлення уваги [14].

Для прямої взаємодії з екосистемою OpenStreetMap у системі «TerraCalm» інтегровано спеціалізовану мову запитів Overpass Query Language (Overpass QL). На відміну від класичних REST API, які повертають фіксовані набори даних, Overpass QL дозволяє конструювати складні просторові фільтри, які виконуються на сервері Overpass API (`overpass-api.de`), що зменшує обсяг даних, які передаються клієнту порівняно із завантаженням повного набору даних. Кількісну оцінку ефективності фільтрації наведено у підрозділі 4.8.

У рамках ETL-конвеєру (вилучення, перетворення та завантаження даних) система не завантажує всю карту (що призвело б до переповнення пам'яті), а виконує точкові запити за концепцією Bounding Box (обмежувального прямокутника). Формування запитів до Overpass API здійснюється із застосуванням декларативних фільтрів за ключами та

значеннями тегів, які підтримують використання регулярних виразів для евристичного оцінювання параметрів. Об'єктами вибірки є просторові сутності, що містять атрибути, необхідні для подальшого розрахунку індексів теорії відновлення уваги (Attention Restoration Theory, ART), зокрема: leisure=park, natural=tree, amenity=shelter. Отримана у форматі JSON (JavaScript Object Notation) відповідь сервера містить геопросторові координати та масиви вкладених семантичних метаданих. Для обробки цих даних у структурі backend-частини передбачено проміжний програмний модуль (парсер), який виконує десеріалізацію JSON-об'єктів, фільтрацію нерелевантних атрибутів (таких як графік роботи або контактні дані) та структурування геоданих для їхнього збереження у просторовій базі даних SpatiaLite.

2.2 Концепція гібридної архітектури та дворівневої обробки даних

Для реалізації системи обрано гібридну архітектурну модель, що базується на поєднанні концепцій периферійних обчислень (Edge Computing) та клієнт-серверної взаємодії. Вибір на користь Edge-архітектури, де роль обчислювального вузла виконує клієнтське середовище браузера, дозволяє мінімізувати мережеві затримки та забезпечити суворий рівень приватності користувача. У такій конфігурації серверна частина відповідає виключно за постачання сирих геопросторових і семантичних даних міста, тоді як процеси персоналізації, обчислення підсумкового рейтингу релевантності за методами багатокритеріального аналізу та формування фінальних рекомендацій виконуються безпосередньо на периферійному пристрої користувача.

Така дворівнева модель дозволяє ефективно вирішити проблему семантичного розриву: алгоритми NLP, що вимагають значних обчислювальних ресурсів, працюють асинхронно, не впливаючи на плавність інтерфейсу.

Логіка системи структурно розділена на два незалежні потоки обробки даних.

Синхронний потік (UI/Search Thread). Цей потік є критичним для користувацького досвіду (UX) і відповідає за миттєву реакцію системи. Основні принципи його роботи:

- оперативність: потік оперує виключно десеріалізованими та вже проіндексованими об'єктами з локальної бази Spatialite. Завдяки відсутності мережових запитів у цьому циклі, швидкість ранжування N локацій визначається кількістю об'єктів у кеші;

- контекстна адаптація: синхронний потік у реальному часі реагує на зміну фільтрів (наприклад, підвищення важливості тиші або безпеки), миттєво перераховуючи вектори релевантності за формулою лінійної згортки;

- візуалізація: відповідає за безшовне відображення результатів на карті та генерацію текстового обґрунтування відповідності (Match Reason) за допомогою XAI-модуля.

Асинхронний потік (Background Worker). Цей потік функціонує як автономний агент, що забезпечує «інтелектуальний тил» системи. Його завдання включають:

- випереджальне завантаження (Pre-fetching): аналізуючи вектор руху користувача, фоновий процес (worker) завчасно ініціює запити до Overpass API для зон, в які користувач може потрапити через 5–10 хвилин;

- «прогрів» кешу та NLP-збагачення: саме тут відбувається трансформація вихідних OSM-тегів у компоненти 12-вимірного вектора V_l . Модуль Stanza обробляє відгуки у фоновому режимі, збагачуючи цифрові паспорти локацій семантичними маркерами;

- підтримка цілісності: асинхронний воркер контролює актуальність даних (TTL) та виконує процедури очищення застарілого кешу, щоб обсяг використовуваної пам'яті (Memory Footprint) застосунка не перевищував допустимі норми мобільної ОС.

Такий розподіл обов'язків реалізує архітектурний патерн поділу відповідальності (Separation of Concerns). З точки зору користувача інтерфейс відображає результати ранжування без помітних затримок, оскільки ресурсоемна обробка даних виконується асинхронно. Взаємодія між потоками реалізована через локальну БД, яка виступає «шиною даних», що зменшує ризик конфліктів доступу та дозволяє системі функціонувати навіть за умови повної відсутності інтернет-з'єднання на основі вже завантаженого кешу.

2.3 Інженерна реалізація механізму «Активного радіуса» та архітектура буферів оперативної пам'яті

Для забезпечення зменшення затримок при відображенні та ранжуванні великої кількості локацій у системі «TerraCalm» впроваджено архітектурне рішення на основі динамічних буферів оперативної пам'яті. Замість статичного завантаження всієї карти міста, що призвело б до надмірного споживання RAM та перевантаження процесора (CPU), система реалізує концепцію «Активного радіуса». З точки зору програмної інженерії, це реалізується через систему трьох концентричних буферів, кожен з яких має різний пріоритет обробки та стан життєвого циклу об'єктів.

Перший рівень – це зона миттєвої готовності (Inner Circle), яка являє собою «гарячий» кеш в оперативній пам'яті. У цій зоні зберігаються об'єкти, що пройшли повну векторизацію та мають сформовані цифрові паспорти V_l . Дані в цьому буфері знаходяться у стані готових до використання (Ready-to-use), що дозволяє синхронному потоку виконувати операції ранжування та відображення миттєво. Структура даних у цьому буфері оптимізована для швидкого доступу через індекси в пам'яті, що усуває необхідність звертатися до дискової підсистеми під час зміни користувачем фільтрів чутливості.

Другий рівень – це зона префетчингу (Pre-fetch Buffer), яка функціонує як проміжний «теплий» буфер. У цій області асинхронний воркер ініціює фонові потоки для завантаження даних (I/O-bound операції), але вектори ще не пройшли етап завершального збагачення через NLP-модуль. Інженерна перевага такого підходу полягає у випереджальному заповненні черги обробки: коли користувач пересувається містом, об'єкти з буфера префетчингу поступово переходять до «гарячого» кешу, проходячи стадію інтелектуального аналізу заздалегідь.

Третій рівень – це зона деструкції (Eviction Zone), що відповідає за вивільнення ресурсів. Дані об'єктів, які опинилися за межами $R_a + \Delta$, маркуються як неактуальні. Алгоритм очищення пам'яті не просто видаляє ці об'єкти, а аналізує їхній статус: якщо локація знаходиться у списку «Вибраного», система зберігає її статичні координати, але видаляє важкі семантичні вектори та теги. Таке дворівневе керування пам'яттю дозволяє системі підтримувати стабільно низьке споживання ресурсів пристрою (Memory Footprint) навіть під час тривалого використання застосунка.

2.4 Проєктування динамічної бази даних та вибір СУБД для Edge AI

Ефективне функціонування модуля семантичного ранжування вимагає надійної інфраструктури збереження та швидкого доступу до інформації [15]. Відповідно до поставлених завдань, ядро бази даних системи повинно задовольняти дві критичні вимоги: підтримувати складні просторові типи даних для геофільтрації локацій та забезпечувати високу швидкодію під час математичних операцій із 12-вимірними цифровими паспортами на стороні клієнта. З метою вибору найефективнішого інструментарію проведено порівняльний аналіз архітектурних та продуктивних показників таких систем, як SpatiaLite, PostgreSQL та MongoDB (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняння систем управління базами даних для мобільного використання

	Spatialite (SQLite)	PostgreSQL, PostGIS	MongoDB (Realm)
Тип архітектури	Вбудована (Embedded)	Клієнт-серверна	Об'єктно-орієнтована
Просторові індекси	R-Tree (висока швидкість)	GiST (дуже висока)	Geohash (середня)
Залежність від мережі	Нульова (офлайн)	Повна	Часткова
Споживання ресурсів	Мінімальне	Високе	Середнє
Формат запитів	Стандартний SQL	Розширений SQL	NoSQL запити

Застосування Spatialite як базової СУБД ґрунтується на поєднанні переваг її вбудованої архітектури з нативною підтримкою просторової структури даних R-Tree (Region Tree). У класичних реляційних базах даних пошук об'єктів у радіусі вимагав би повного сканування таблиці (Full Table Scan) із застосуванням ресурсоємної формули гаверсінуса для кожного рядка, що є неприпустимим для мобільних пристроїв. При зберіганні в кеші великої кількості об'єктів (порядку десятків тисяч) міської інфраструктури, такий підхід провокує сотні тисяч операцій з плаваючою комою (Floating-Point Operations) для кожного пошукового запиту. Це призводить до блокування потоку інтерфейсу (UI Thread) та зростання часу відповіді, що є неприпустимим для інтерактивного застосунку.

Просторовий індекс R-Tree вирішує цю апаратну проблему шляхом розумної декомпозиції даних. Замість лінійного перебору, простір поділяється на ієрархічне дерево вкладених мінімальних обмежувальних прямокутників (Minimum Bounding Rectangles, MBR). Кожен вузол дерева містить не самі об'єкти, а лише координати меж прямокутника, який повністю охоплює всі дочірні геометрії. Кореневий вузол дерева може

охоплювати ціле місто, проміжні вузли – окремі райони, а листові вузли – конкретні парки чи вулиці.

Архітектуру такої просторової декомпозиції та відображення географічних зон структури даних наведено на рисунку 2.1. Як видно зі схеми, географічний простір послідовно розбивається на кілька рівнів деталізації (Level 0, Level 1, Level 2). На нижніх рівнях формуються вузли дерева, які зберігають координати MBR (наприклад, M1, M2, M3), що безпосередньо обмежують геометрію конкретних локацій. Під час виконання запиту система не сканує всі об'єкти масиву, а спускається по гілках дерева, миттєво відкидаючи ті просторові квадранти (наприклад, сектори 00 або 10 на Level 1), які не перетинаються із зоною пошуку користувача.

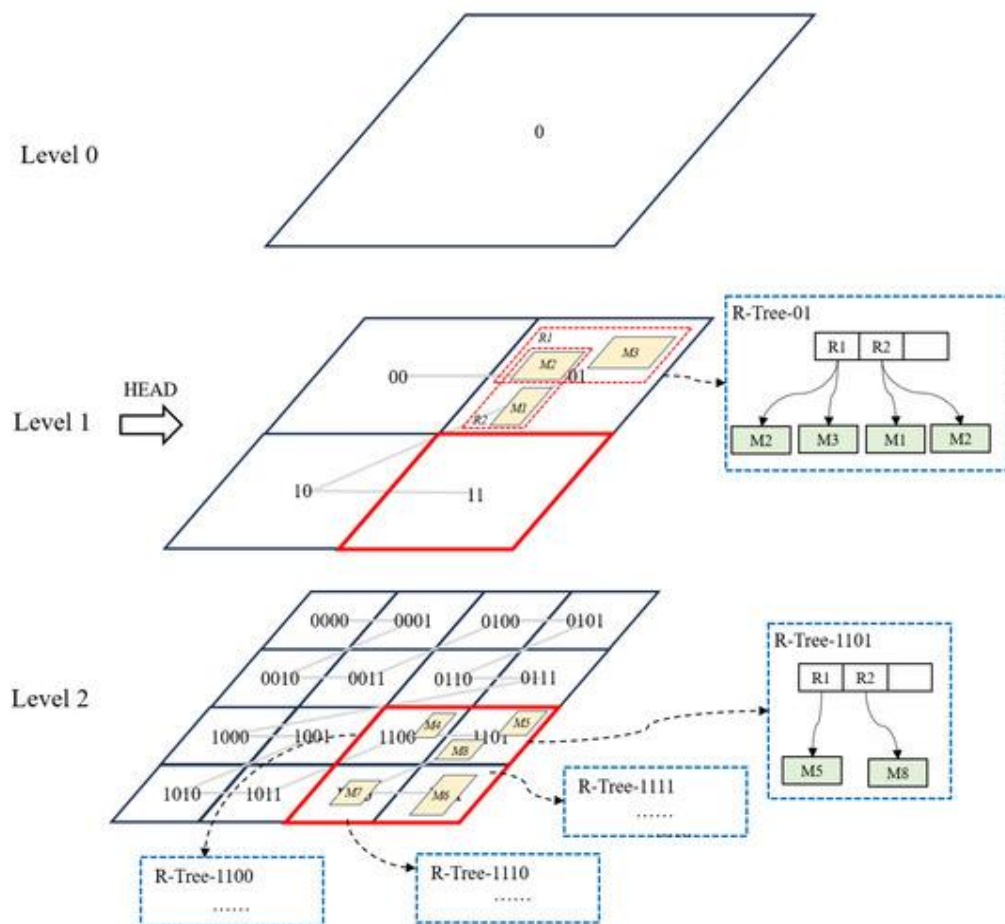


Рисунок 2.1 – Структурна організація просторового індексу R-Tree [16]

Процес пошуку оптимізується таким чином: коли користувач ініціює запит (наприклад, пошук безпечних локацій у радіусі 3 км), рушій Spatialite конвертує цей радіус у пошуковий прямокутник і починає обхід дерева від кореня. Використовуючи базову операцію перевірки перетину меж (MBRIntersects), алгоритм миттєво відкидає цілі гілки дерева (райони міста), які не перетинаються із зоною пошуку користувача. Цей механізм просторового відсікання нерелевантних гілок (pruning) дозволяє системі ігнорувати тисячі нерелевантних об'єктів, навіть не зчитуючи їхні детальні характеристики з дискової пам'яті у RAM, що зменшує очікувану часову складність пошуку до логарифмічної $O(\log N)$ у збалансованому випадку порівняно з $O(N)$ при лінійному скануванні.

Для роботи інтелектуальної системи «TerraCalm» це означає, що розрахунок векторів V_l виконується лише для об'єктів, що потрапили до результату просторового запиту, що зменшує обчислювальне навантаження. Крім того, просторові індекси зберігаються в окремих бінарних файлах, що мінімізує фрагментацію основної бази даних під час роботи алгоритмів очищення кешу (Cache Eviction).

2.5 Алгоритми інтелектуального очищення кешу та життєвого циклу даних

Динамічність та актуальність локальної бази даних забезпечуються інтеграцією спеціалізованої політики витіснення кешу (Cache Eviction Policy). Оскільки обчислювальні та оперативні ресурси мобільного пристрою є обмеженими, розроблено та реалізовано механізм автоматичної деструкції та інвалідації застарілих елементів кешу. Цей підхід дозволяє запобігти надлишковому накопиченню просторових даних у пам'яті смартфона та оптимізувати швидкість виконання пошукових запитів. Загальну схему життєвого циклу об'єктів і логіку роботи цього механізму наведено на рисунку 2.2.

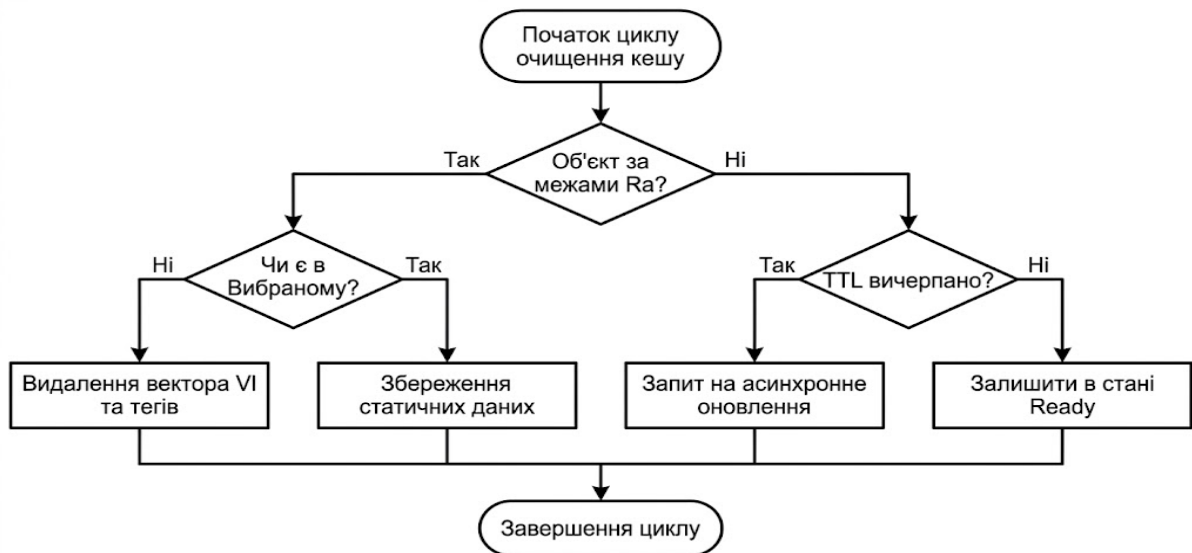


Рисунок 2.2 – Алгоритм управління життєвим циклом об'єктів та просторового витіснення (Cache Eviction)

Відповідно до розробленої архітектури, кожен геопросторовий об'єкт у базі даних має чітко визначений життєвий цикл, контроль якого здійснюється на основі детермінованого комплексу критеріїв:

- просторова інвалідація (Spatial Eviction). Даний критерій базується на динамічному обчисленні евклідової відстані між поточною геопозицією користувача та об'єктами, збереженими в локальній базі даних. Якщо об'єкт виходить за межі встановленого активного радіуса моніторингу, він маркується системою як нерелевантний і підлягає автоматичному видаленню з оперативної пам'яті для вивільнення ресурсів під нові просторові квадранти;

- часова очистка (Time-To-Live, TTL). Кожен запис про локацію в базі даних супроводжується часовою міткою (timestamp) останнього синхронізаційного оновлення сервера. Часовий критерій є критично важливим для збереження консистентності динамічних атрибутів локацій, таких як рівень акустичного навантаження (шуму) або коефіцієнт затишку в межах міського середовища.

Якщо інтервал часу між поточною міткою та часом останнього оновлення перевищує заданий константний поріг (наприклад, 24 години), асинхронний фоновий потік (background thread) ініціює процедуру оновлення або повної деструкції запису. Передбачається, що такий підхід дозволить враховувати динамічні зміни міської інфраструктури, зокрема проведення планових ремонтних робіт, масових заходів або сезонні коливання відвідуваності паркових зон.

2.6 Асинхронний NLP-аналіз відгуків та збагачення паспортів локацій

Процес перетворення неструктурованого тексту на формалізовані атрибути цифрового паспорта локації V_l реалізовано у формі багатоетапного асинхронного конвеєра обробки даних (NLP Pipeline). Головним завданням цього модуля є вилучення семантичних маркерів комфорту та безпеки з текстових відгуків, які доповнюють формалізовані атрибути картографічних тегів.

Вибір технологічного інструментарію для лінгвістичного аналізу базується на необхідності глибокої обробки української мови, яка характеризується складною морфологією та вільним порядком слів. Основним інструментом обрано бібліотеку Stanza (Stanford NLP). На відміну від популярної бібліотеки SpaCy, яка орієнтована на швидкість обробки великих масивів даних, Stanza пропонує значно вищу точність лематизації та морфологічного аналізу. Це досягається завдяки використанню нейромережових моделей, навчених на корпусах Universal Dependencies.

Використання нейромережевого підходу накладає певні апаратні обмеження. Завантаження та ініціалізація повновагових мовних моделей Stanza потребують значного обсягу оперативної пам'яті. Враховуючи роботу в умовах Edge-обчислень, цей модуль має бути ізольовано в окремому мікросервісі (NLP Worker), що дозволяє системі стабільно

функціонувати навіть за дефіциту ресурсів на основному картографічному ядрі.

Структура ETL-конвеєру у межах NLP-модуля складається з 3 етапів.

Перший – Extract – агрегація та очищення. Система збирає текстові метадані з OpenStreetMap і локальні відгуки користувачів. На цьому етапі відбувається денормалізація тексту та його первинне очищення від технічного шуму (HTML-тегів, дублікатів і спаму), що формує «чистий» масив для подальшого аналізу.

Другий – Transform – лінгвістична трансформація. Текст передається до пайплайну Stanza, де виконуються токенізація, морфологічний розбір і лематизація. Ключовою особливістю цього етапу є здатність алгоритму розпізнавати контекстні зв'язки. Це дозволяє системі коректно обробляти семантичні конструкції із запереченнями, наприклад, відрізняючи відгук «тихо» від «зовсім не тихо». Точність лематизації є важливою, оскільки помилкова інтерпретація відгуку (наприклад, «не тихо» → «тихо») може призвести до хибної оцінки характеристик локації.

Третій – Load – синтез та інтеграція. Виділені лінгвістичні дескриптори конвертуються у числові ознаки, які інтегруються в загальну структуру цифрового паспорта. Результати обробки асинхронно записуються в локальну базу даних SpatiaLite, забезпечуючи оновлення 12-вимірному вектора локації.

Завдяки такій організації обчислень семантичне збагачення цифрових паспортів локацій виконується повністю у фоновому режимі. Математичні механізми вагового мапінгу та алгоритми безпосереднього розрахунку компонентів вектора на основі виділених лексем детально описані в розділі 3. У результаті такого підходу система безперервно підтримує актуальність семантичних профілів середовища, не створюючи затримок у роботі клієнтського застосунку. Це суттєво підвищує загальну точність та адаптивність генерації персоналізованих рекомендацій.

2.7 Обґрунтування технологічного стеку та середовища розробки

Для забезпечення високої продуктивності та надійності інтелектуального ядра системи «TerraCalm» обрано мову програмування Python 3.10+. Цей вибір обумовлений наявністю спеціалізованих бібліотек для геопросторового аналізу (OSMnx, Shapely, PyProj) та обробки даних (NumPy, Pandas). Використання бібліотек OSMnx та Shapely дозволяє системі ефективно маніпулювати складними геометричними об'єктами та графами міських вулиць, тоді як PyProj забезпечує математично точне перетворення координат між різними картографічними проєкціями. Обробка та структурування отриманої інформації здійснюються за допомогою NumPy та Pandas, що надають можливість виконувати високоефективні матричні операції, необхідні для швидкого ранжування векторів локацій.

Фундаментом для взаємодії між мобільним інтерфейсом та аналітичними модулями є серверна архітектура, розроблена на базі сучасного фреймворку FastAPI. На відміну від традиційних синхронних рішень, FastAPI базується на специфікації ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface), що є ключовим фактором для систем, орієнтованих на роботу в реальному часі. Це дозволяє «TerraCalm» підтримувати тисячі одночасних конкурентних підключень до зовнішніх джерел даних та API OpenStreetMap без блокування основного потоку виконання. Завдяки асинхронності запити від користувачів на отримання нових сегментів карти обробляються паралельно з внутрішніми обчислювальними процесами, що мінімізує час очікування відповіді та підвищує загальну чутливість системи.

Для реалізації клієнтської частини системи (Frontend) обрано екосистему на базі бібліотеки React. Компонентна модель React забезпечує автоматичне оновлення інтерфейсу при зміні параметрів фільтрації, що відповідає потребам динамічного відображення геопросторових даних. Як інструмент збирання проєкту використовується Vite, що забезпечує миттєве

гаряче перезавантаження (HMR), а для стилізації інтерфейсу застосовується utility-first фреймворк Tailwind CSS. Такий стек дозволяє створити легкий, адаптивний Single-Page Application (SPA), який швидко взаємодіє з серверними API та картографічною підсистемою Leaflet.

Побудова системи на засадах мікросервісної архітектури дозволяє досягти високої модульності та відмовостійкості. Центральним елементом цієї структури є API Gateway, який функціонує як єдина точка входу для всіх клієнтських запитів і відіграє роль інтелектуального диспетчера трафіку. Окрім безпосередньої маршрутизації сигналів до відповідних функціональних блоків, цей сервіс здійснює глибоку валідацію вхідних даних за допомогою бібліотеки Pydantic. Такий підхід гарантує, що будь-які структурні аномалії або некоректні координати відсікаються ще на периферії, не навантажуючи внутрішні обчислювальні ресурси інтелектуального ядра.

Для забезпечення структурної цілісності даних у системі «TerraCalm» розроблено ієрархію валідаційних схем (Schemas) на основі класу BaseModel. Використання Pydantic дозволяє декларативно описувати очікувану структуру об'єктів, що надходять із зовнішніх API, та забезпечити їхню відповідність типам даних ще до початку етапу семантичного аналізу.

Критичним аспектом є обробка неповних або некоректних даних, які можуть надходити з OpenStreetMap (OSM). Зокрема, типовою аномалією є відсутність обов'язкових полів координат (lat, lon) або передача значень, що виходять за допустимі діапазони (наприклад, широта поза межами [-90; 90]). У таких випадках Pydantic автоматично генерує виняток ValidationError.

Система обробляє ці помилки за допомогою механізму Exception Handling на рівні API Gateway. Замість аварійного завершення роботи воркера, об'єкт, що не пройшов валідацію, логується як «сміттєвий» (junk data) і виключається з конвеєра обробки. Це забезпечує відмовостійкість конвеєра: невалідний об'єкт виключається з обробки без впливу на решту масиву.

У лістингу 2.1 наведено приклад програмної реалізації схеми валідації, що використовується для фільтрації вхідних геоданих.

Лістинг 2.1 – Програмна реалізація схеми валідації

```
from pydantic import BaseModel, Field, validator
from typing import Optional, Dict

class LocationValidationSchema(BaseModel):
    """Схема для пре-валідації необроблених даних з
    OpenStreetMap"""
    osm_id: int
    name: Optional[str] = "Unknown Location"
    # Обов'язкові координати з жорсткими обмеженнями
    діапазону
    lat: float = Field(..., gt=-90, lt=90)
    lon: float = Field(..., gt=-180, lt=180)
    tags: Dict[str, str]
    @validator('tags')
    def check_min_tags(cls, v):
        # Відсікаємо об'єкти без семантичного наповнення
        if not v or len(v) < 1:
            raise ValueError("Об'єкт не містить тегів для
    аналізу")
        return v

# Приклад обробки виключної ситуації при парсингу
try:
    # Об'єкт без координат (lat/lon), що призведе до
    ValidationError
    raw_data = {"osm_id": 12345, "tags": {"leisure":
    "park"}}
    location = LocationValidationSchema(**raw_data)
except Exception as e:
    # Логування та безпечне ігнорування об'єкта
    print(f"Дані відхилено: {e}")
```

Декларативна валідація через Pydantic замінює ручну перевірку умовними операторами, підвищуючи читабельність коду та гарантуючи, що ресурсоемні операції виконуються лише для валідних об'єктів.

Найбільш технологічно складним компонентом інфраструктури є NLP Worker, винесений у цілком ізольований контейнер. Така декомпозиція архітектури зумовлена специфікою роботи бібліотеки Stanza, яка використовує глибокі нейромережеві моделі для лінгвістичного аналізу.

Враховуючи, що завантаження та ініціалізація ваг мовних моделей потребують значного обсягу оперативної пам'яті (близько 1,5 ГБ), ізоляція цього сервісу дозволяє уникнути конфліктів ресурсів із базовим ядром системи. Це забезпечує стабільну роботу асинхронного потоку, де аналіз відгуків і формування семантичних дескрипторів можуть виконуватися незалежно від основного інтерфейсу без впливу на продуктивність.

Ефективне управління геоінформаційним шаром реалізується через Spatial DB Container – високопродуктивне сховище «гарячих» даних. Основне призначення цього компонента полягає у забезпеченні механізму префетчингу, що дозволяє заздалегідь готувати та зберігати цифрові паспорти локацій у зоні потенційного пересування користувача.

Уся описана екосистема обробки даних інкапсульована за допомогою технології контейнеризації Docker. Використання Docker Compose забезпечує відтворюваність середовища розробки та розгортання, зменшуючи ризик конфліктів залежностей. Це критично важливо для стабільної роботи лінгвістичних алгоритмів, оскільки дозволяє уникнути будь-яких конфліктів версій мовних моделей або залежностей від складних картографічних бібліотек під час розгортання системи.

Контейнеризація також спрощує горизонтальне масштабування: за необхідності система може динамічно розгортати додаткові екземпляри NLP-воркерів.

2.8 Механізм забезпечення конфіденційності та анонімізації даних

Враховуючи роботу з категоріями користувачів, які мають травматичний досвід, зокрема ветеранами з ПТСР та внутрішньо переміщеними особами, захист персональних даних є фундаментальною вимогою до архітектури системи «TerraCalm». Захист персональних даних реалізовано за принципом Privacy by Design: механізми конфіденційності інтегровано в архітектуру системи, а не додано як окремий модуль [17].

Ключовим технічним рішенням є впровадження концепції Edge Intelligence, за якої найбільш критичні дані – вектор довгострокових потреб користувача V_u , його точні маршрути та психологічний профіль – обробляються виключно локально й ніколи не залишають пристрій. На відміну від традиційних систем, де персоналізація відбувається на сервері, «TerraCalm» реалізує обчислення рейтингу локацій на стороні клієнта. Це гарантує, що сервер ніколи не отримує інформації про конкретні рівні чутливості або психологічні потреби особи.

Для забезпечення цілісності та конфіденційності даних на Edge-рівні застосовується локальне шифрування за стандартом AES-256 (Advanced Encryption Standard). Вибір саме 256-бітного ключа обумовлений його стійкістю до атак методом повного перебору, що робить його стандартом для захисту державної та медичної таємниці. Проте критичним аспектом безпеки є не лише алгоритм, а й механізм управління ключами.

В архітектурі «TerraCalm» генерація та зберігання ключів шифрування реалізовані через використання апаратно ізольованих середовищ пристрою. У смартфонах на базі Android використовується система Android Keystore, а в iOS – Apple Secure Enclave. Ключ шифрування генерується всередині захищеного співпроцесора (Secure Element) і ніколи не потрапляє в оперативну пам'ять основної ОС у відкритому вигляді. Це суттєво ускладнює вилучення ключа, оскільки він зберігається в апаратно ізольованому середовищі. Навіть за умови отримання адміністративного

доступу до пристрою (Root/Jailbreak) вилучення ключа потребує обходу апаратного захисту, що є значно складнішим порівняно з атаками на програмне сховище. Таким чином, вектор інтересів V_u та локальна база SpatiaLite залишаються зашифрованими й недоступними для зовнішнього аналізу.

Мережева взаємодія між клієнтською частиною системи і зовнішніми API відбувається через протокол транспортної безпеки TLS 1.3. Вибір цієї версії протоколу замість попередньої TLS 1.2 зумовлений двома факторами: посиленою безпекою та зменшенням мережеских затримок.

У контексті безпеки TLS 1.3 виключає підтримку вразливих алгоритмів шифрування та застарілих механізмів хешування, що робить комунікацію стійкою до атак типу Downgrade.

З точки зору продуктивності, TLS 1.3 є оптимальним рішенням для роботи в умовах нестабільного мобільного інтернету, що є характерним для сучасної інфраструктури України. Протокол підтримує функцію 0-RTT (Zero Round Trip Time) – механізм швидкого відновлення сесії. На відміну від TLS 1.2, де для встановлення з'єднання потрібно два повні цикли обміну даними між клієнтом і сервером (2-RTT handshake), TLS 1.3 дозволяє клієнту надсилати зашифровані дані (наприклад, запит до Overpass API) вже в першому повідомленні під час повторного підключення.

Для користувача «TerraCalm», що пересувається містом, це означає миттєве завантаження нових сегментів карти навіть під час частих обривів зв'язку та перемиканні між вежами Wi-Fi-мережі. Мінімізація затримок (latency) не лише покращує користувацький досвід, а й скорочує час перебування радіомодуля в активному стані, що економить заряд батареї – критичний ресурс у кризових ситуаціях.

Додатковий рівень безпеки забезпечується через ізоляцію процесів у програмному середовищі за принципом «пісочниці» та стратегію повної анонімізації. Замість збору персональних даних, кожному пристрою

присвоюється унікальний анонімний ідентифікатор UUID. Система суворо дотримується принципу мінімізації даних: будь-яка тимчасова інформація про поточні сесії пошуку автоматично видаляється з оперативної пам'яті одразу після завершення роботи, що повністю виключає ризик накопичення надлишкових відомостей про пересування особи.

Описана мікросервісна інфраструктура є цільовою для промислового розгортання системи та потребує участі команди розробників для повноцінної реалізації. Водночас для первинної верифікації розроблених математичних моделей та тестування інтерфейсу в рамках кваліфікаційної роботи доцільно реалізувати автономний клієнтський MVP-прототип (розділ 4), обчислювальна логіка якого інкапсульована в браузері. Такий підхід дозволяє незалежно валідувати алгоритмічне ядро системи без необхідності розгортання повної серверної інфраструктури.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ СЕМАНТИЧНОГО РАНЖУВАННЯ

3.1 Концептуальна парадигма та формалізація предметної області

Фундаментальною проблемою, яку вирішує розроблена система «TerraCalm», є подолання семантичного розриву між об'єктивними, формалізованими метаданими міського середовища та суб'єктивними, важко формалізованими потребами користувача у психоемоційному відновленні. Для вирішення цієї задачі у роботі запропоновано гібридну архітектуру, що синтезує методи геоінформаційного аналізу, багатокритеріального аналізу та обробку природної мови.

Математична постановка задачі зводиться до побудови відображення простору різнорідних фізичних атрибутів локації у векторний простір станів відновлення, у якому можливе виконання операцій порівняння та ранжування. Система формально описується як кортеж (L, C, KB, I) , де L – множина геопросторових об'єктів, C – модель просторового контексту, KB – база експертних знань, а I – інтерпретатор намірів. Ключовою одиницею обробки інформації є поняття «Цифрового Паспорта Локації» – багатовимірний вектор, що агрегує як внутрішні статичні властивості об'єкта, так і динамічний вплив його оточення.

3.2 Багатовимірна векторна модель локації

Ключовим елементом системи є перехід від текстових тегів до векторного представлення даних (Vector Space Model). Це дозволяє застосовувати методи лінійної алгебри для обчислення ступеня відповідності локації потребам користувача.

Векторний профіль локації (V_l). На фізичному рівні у базі даних рекреаційні зони зберігаються у вигляді плоских наборів базових

інфраструктурних метрик (наприклад, v_{quiet} , $v_{privacy}$, v_{cozy} , v_{price}). Проте для забезпечення математичної узгодженості алгоритмів ранжування, під час ініціалізації системи ці необроблені дані проходять через утиліту Векторного Адаптера (ETL-конвеєр). Адаптер обчислює на їх основі цільовий цифровий паспорт локації (ЦПЛ) – вектор V_l у дванадцятимірному евклідовому просторі R^{12} :

$$V_l = \begin{pmatrix} \text{quietness} \\ \text{greenery} \\ \text{biodiversity} \\ \text{waterPresence} \\ \text{aestheticValue} \\ \text{crowdLevel} \\ \text{accessibility} \\ \text{safety} \\ \text{restorationPotential} \\ \text{walkingComfort} \\ \text{sensoryRelief} \\ \text{solitudePotential} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Кожна компонента вектора нормалізована у діапазоні $[0, 1]$ і має чітку семантику, що базується на теоріях відновлення уваги:

- психоемоційний кластер: `quietness` (акустичний комфорт), `sensoryRelief` (захист від міських подразників), `solitudePotential` (можливість усамітнення);
- біофільний кластер: `greenery` (озеленення), `biodiversity` (жива природа), `waterPresence` (водойми);
- інфраструктурний кластер: `aestheticValue` (естетика простору), `walkingComfort` (зручність пересування), `accessibility` (інклюзивність);
- кластер безпеки та навантаження: `safety` (освітленість та оглядовість), `crowdLevel` (рівень натовпу), `restorationPotential` (комплексний потенціал відновлення).

Вектор профілю користувача (V_u). Користувач $u \in U$ у системі асоціюється з вектором поточних інтересів $V_u \in R^k$, розмірність якого ідентична паспорту локації. Цей вектор відображає «вагу» або важливість кожної з 12 характеристик для конкретної людини у поточний момент часу, де кожне значення також лежить у межах $[0.1, 1.0]$.

Модель контексту (C). Контекст формалізується як чотирикомпонентний кортеж (впорядкована четвірка), що належить декартовому добутку множин можливих просторово-часових та семантичних станів:

$$C = (G, T, \Omega, Q), \quad (3.2)$$

де G – поточна геопозиція (широта, довгота або обраний адміністративний район міста);

T – темпоральний атрибут (час доби, день тижня);

Ω – погодні умови;

Q – поточний текстовий запит (намір), що вводиться під час початкового налаштування профілю (onboarding) та трансформується у вектор V_u .

3.3 Ключові аналітичні функції системи

Архітектура «TerraCalm» реалізує ієрархічну систему оцінки об'єктів. Базовим інструментом визначення релевантності є не пряме порівняння необроблених векторів, а обчислення проміжних інтегральних метрик простору на основі 12-вимірного паспорта локації. Такий підхід дозволяє знизити розмірність задачі та агрегувати споріднені ознаки у зрозумілі терапевтичні категорії. Система виділяє три базові аналітичні функції, кожна з яких відображає у скалярне значення діапазону $[0, 1]$.

Функція психологічного комфорту (Comfort). Оцінює базову придатність локації для перебування шляхом згортки показників тиші, зручності, сенсорного розвантаження та інклюзивності:

$$M_{comfort} = 0.35 \cdot l_{quietness} + 0.25 \cdot l_{walkingComfort} + 0.25 \cdot l_{sensoryRelief} + 0.15 \cdot l_{accessibility}. \quad (3.3)$$

Найбільшу питому вагу у цій функції має параметр акустичного спокою (0.35), оскільки зниження рівня техногенного міського шуму є першочерговою умовою для зменшення базової тривожності. Сенсорне розвантаження та зручність пішохідних зон виступають рівноцінними підкріплювальними факторами.

Функція безпеки (Safety). Визначає рівень захищеності простору на основі показників фізичної безпеки та доступності:

$$M_{safety} = 0.8 \cdot l_{safety} + 0.2 \cdot l_{accessibility}. \quad (3.4)$$

Домінування фактора базової безпеки (0.8) гарантує, що локації з низьким рівнем освітленості, обмеженим оглядом території або наявністю потенційних загроз отримують суттєві штрафні бали. Це критично важливо для цільових груп користувачів із проявами ПТСР (посттравматичного стресового розладу) або підвищеною гіпервігільністю.

Функція відновлювального потенціалу (Restoration). Оцінює терапевтичний ресурс локації згідно з екопсихологічною теорією відновлення уваги (ART). Формула інтегрує наявність природних елементів (озеленення, біорізноманіття, доступ до води) із психологічними можливостями середовища, такими як потенціал для усамітнення ($l_{solitudePotential}$) та загальна архітектурно-ландшафтна естетика ($l_{aestheticValue}$).

Вона є найбільш комплексною метрикою і обчислюється як суперпозиція біофільних та естетичних факторів:

$$\begin{aligned}
 M_{restoration} = & 0.2 \cdot l_{greenery} + 0.15 \cdot l_{biodiversity} + \\
 & + 0.15 \cdot l_{waterPresence} + 0.2 \cdot l_{restorationPotential} + \\
 & + 0.15 \cdot l_{solitudePotential} + 0.15 \cdot l_{aestheticValue}.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Математичне забезпечення обчислювальної стабільності. Для унеможливлення математичних аномалій (наприклад, помилок типу NaN при обробці неповних записів з бази даних), у систему інтегровано механізм заміни пропущених значень (imputation) `safe()`. Математично цей механізм описується кусково-заданою функцією:

$$f_{safe}(x) = \begin{cases} x, & \text{якщо } x \in R \text{ та } 0 \leq x \leq 1 \\ 0.5, & \text{в іншому випадку} \end{cases}.
 \tag{3.6}$$

Це архітектурне рішення гарантує, що відсутність одного з параметрів локації у базі даних не призведе до занулення всієї інтегральної метрики. Замість цього системному алгоритму передається нейтральне медіанне значення (0.5), що підвищує загальну відмовостійкість програмного ядра експертної системи.

3.4 Матриця вагових коефіцієнтів для цільових груп

Адаптивність системи забезпечується гнучким, динамічним налаштуванням інтегральної функції оцінювання відповідно до поточних потреб користувача. Замість використання жорстко заданих статичних коефіцієнтів, алгоритм системи, що реалізує методологію багатокритеріального аналізу рішень [19], обчислює персоналізовані ваги для кожної функції безпосередньо з 12-вимірного вектора користувача.

Розрахунок підсумкового рейтингу релевантності об'єкта (Score) має вигляд лінійної згортки аналітичних функцій, до якої додається коригувальний коефіцієнт зворотного зв'язку:

$$\begin{aligned} \text{Score}(u, l, c) = & (W_c \cdot \text{Comfort}(l) + W_s \cdot \text{Safety}(l) + \\ & + W_r \cdot \text{Restoration}(l)) \times \text{Boost}_{fb}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де W_c, W_s, W_r – динамічно розраховані вагові коефіцієнти комфорту, безпеки та відновлення відповідно ($\sum W_i = 1$);

Boost_{fb} формалізовано як обмежену функцію для врахування попереднього колективного досвіду користувачів:

$$\text{Boost}_{fb} = \max\left(-0.2, \min\left(0.2, \alpha \cdot (R_{avg} - 3)\right)\right), \quad (3.8)$$

де $R_{avg} \in [1, 5]$ – середня оцінка локації за відгуками користувачів у базі даних;

$\alpha = 0.1$ – крок коригування.

Математичне забезпечення контуру зворотного зв'язку передбачає обробку таких граничних випадків (edge cases):

– якщо локація є новою або не має жодного внесеного відгуку, застосовується нейтральний мультиплікатор: $\text{Boost}_{fb} = 0$, відповідно базовий множник дорівнює 1.0;

– амплітуда впливу Boost_{fb} штучно обмежена жорстким діапазоном $[-0.2; 0.2]$. Це архітектурне рішення запобігає ситуаціям, коли навмисна маніпуляція рейтингом («накрутка» відгуків) може непропорційно спотворити об'єктивні геопросторові характеристики локації.

Для уникнення ефекту повного ігнорування базових потреб система гарантує мінімальний поріг ваги для кожного критерію на рівні 0.15.

Залежно від сформованого вектора V_u , алгоритм автоматично генерує розподіл пріоритетів. У таблиці 3.1 наведено приклади (патерни) розподілу вагових коефіцієнтів, які генерує алгоритм для типових цільових груп користувачів на основі їхніх запитів.

Таблиця 3.1 – Приклади генерації вагових коефіцієнтів для цільових профілів

Профіль користувача	W_c (Комфорт/Тиша)	W_s (Безпека)	W_r (Відновлення)	Психологічне обґрунтування
Ветеран / Комбатант	0.5	0.35	0.15	Критична потреба у зниженні сенсорного навантаження (тиша) та контролі периметра (безпека). Сервіс є вторинним.
ВПО (Сім'я з дітьми)	0.3	0.5	0.2	Пріоритет надається фізичній безпеці дітей, наявності укриттів та інклюзивності простору.
Цивільний (Burnout)	0.25	0.15	0.6	Максимальна потреба у відновленні уваги (ART) через контакт з природою та усамітнення.

Патерни розподілу вагових коефіцієнтів, наведені у таблиці 3.1, визначено на основі інтеграції положень екологічної психології (відповідно до 1.4.1). Для формалізації та декомпозиції інтегральних функцій $Comfort(l)$, $Safety(l)$ та $Restoration(l)$ застосовано стандартизовану міжнародну методологію сприйнятих сенсорних вимірів простору – Perceived Sensory Dimensions (PSD) [18].

Розподіл параметрів обґрунтовано такими науково-практичними факторами:

– для профілю «Ветеран / Комбатант» домінантним є візуальний та акустичний спокій для зниження сенсорного навантаження та уникнення тригерів бойового стресу, тоді як антропогенна інфраструктура виступає джерелом додаткового стресу і її вплив мінімізовано;

– для профілю «ВПО (Сім'я з дітьми)» пріоритет зміщено в бік просторової передбачуваності, фізичної безпеки та наявності захисної інфраструктури, що відповідає базовим рівням ієрархії потреб;

– для профілю «Цивільний (Burnout)» встановлено найвище значення коефіцієнту відновлення, оскільки поповнення когнітивного ресурсу критично залежить від тривалого перебування у природному середовищі, а акустичний комфорт виступає підкріплюючим фактором.

Матриця інтегрована в логіку прийняття рішень експертної системи і дозволяє динамічно змінювати контур рекомендацій, захищаючи вразливі групи користувачів від невідповідного міського середовища.

3.5 Алгоритмічне забезпечення системи

Основою функціонування інтелектуальної системи «TerraCalm» є комплекс алгоритмів, що забезпечують перетворення неструктурованих користувацьких запитів у формалізовані векторні подання та виконують динамічне просторове ранжування об'єктів в умовах клієнтської автономії. Логіка системи декомпозована на три послідовні алгоритмічні конвеєри: обробка тексту, просторовий пошук та багатокритеріальне оцінювання.

Ключовим викликом під час інтерпретації природної мови користувача в межах Edge-архітектури є необхідність забезпечення високої точності розпізнавання семантики при жорстких обмеженнях обчислювальних ресурсів клієнтського середовища (браузера). З огляду на це у системі застосовано оптимізований метод зваженого пошуку ключових слів із контекстним вікном (Weighted Keyword Spotting), який виступає ресурсоефективною альтернативою великим мовним моделям (LLM).

Схему процесу наочно проілюстровано за допомогою UML-діаграми діяльності на рисунку 3.1.

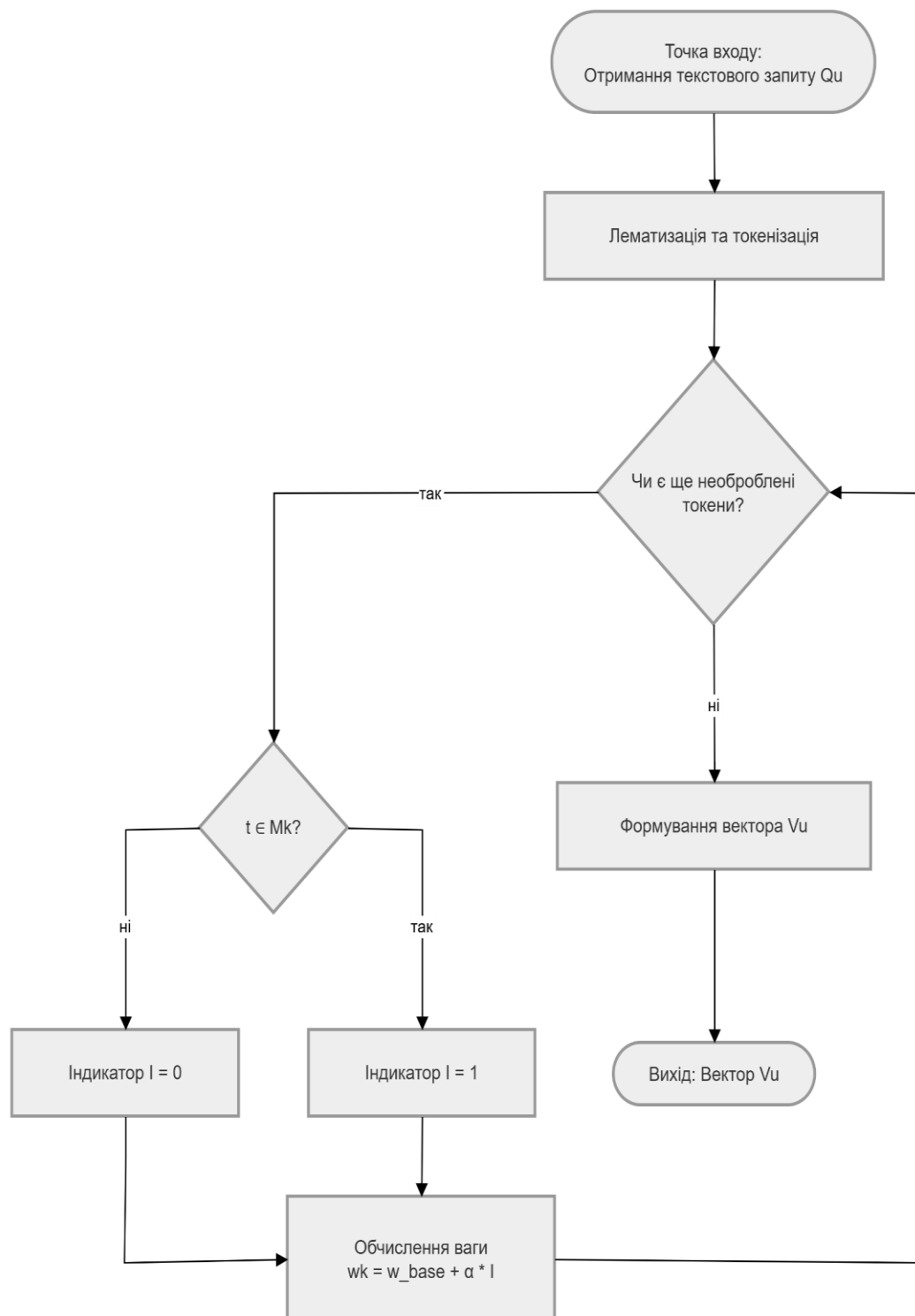


Рисунок 3.1 – UML-діаграма діяльності (Activity Diagram) алгоритму семантичного аналізу запиту

На першому етапі вхідний неструктурований текст проходить лематизацію, нормалізацію та виділення стійких фразових конструкцій (N-грам). Далі система ітеративно звіряє токени із семантичним ядром M_k (базою знань синонімів та лем) для кожної k -ї характеристики. Математично розрахунок ваги w_k виражається формулою:

$$w_k = w_{base} + \beta \cdot \sum_{t \in Q} I(t \in M_k) \times M_{context}, \quad (3.9)$$

де M_k – семантичне ядро для k -ї характеристики;

I – індикаторна функція (1, якщо лему знайдено, 0 – якщо ні);

β – емпіричний коефіцієнт підсилення;

w_{base} – базовий рівень;

$M_{context}$ – коефіцієнт віконного аналізу контексту, що враховує підсилювачі, послаблювачі та інверсію при запереченнях.

Алгоритм динамічного збору даних та векторної адаптації. Для оптимізації ресурсоємних операцій із геопросторовими даними розроблено алгоритм «ковзного вікна». Система відстежує кількість векторизованих об'єктів N_{local} у межах активного радіуса R навколо геопозиції $G(x,y)$. Умова запуску (тригер) асинхронного запиту до зовнішнього просторового контуру або Overpass API для імпорту нових об'єктів (категорії amenity, leisure, tourism) спрацьовує за умови:

$$N_{local} < N_{min}, \quad (3.10)$$

де N_{min} – встановлений поріг достатності даних для забезпечення варіативності рекомендацій.

Крім того, алгоритм «ковзного вікна» безперервно враховує динаміку переміщення користувача в урбаністичному середовищі: як тільки поточні координати наближаються до межі внутрішнього радіуса на відстань

$d < \varepsilon$ (де ε – параметр, що залежить від швидкості руху пристрою), центр вікна автоматично зміщується у нову точку $G'(x, y)$. Це призводить до миттєвого перерахунку просторових відношень і формування нового циклу збору даних. Детальну логіку взаємодії компонентів під час цього процесу наочно ілюструє UML-діаграма послідовностей (рисунок 3.2).

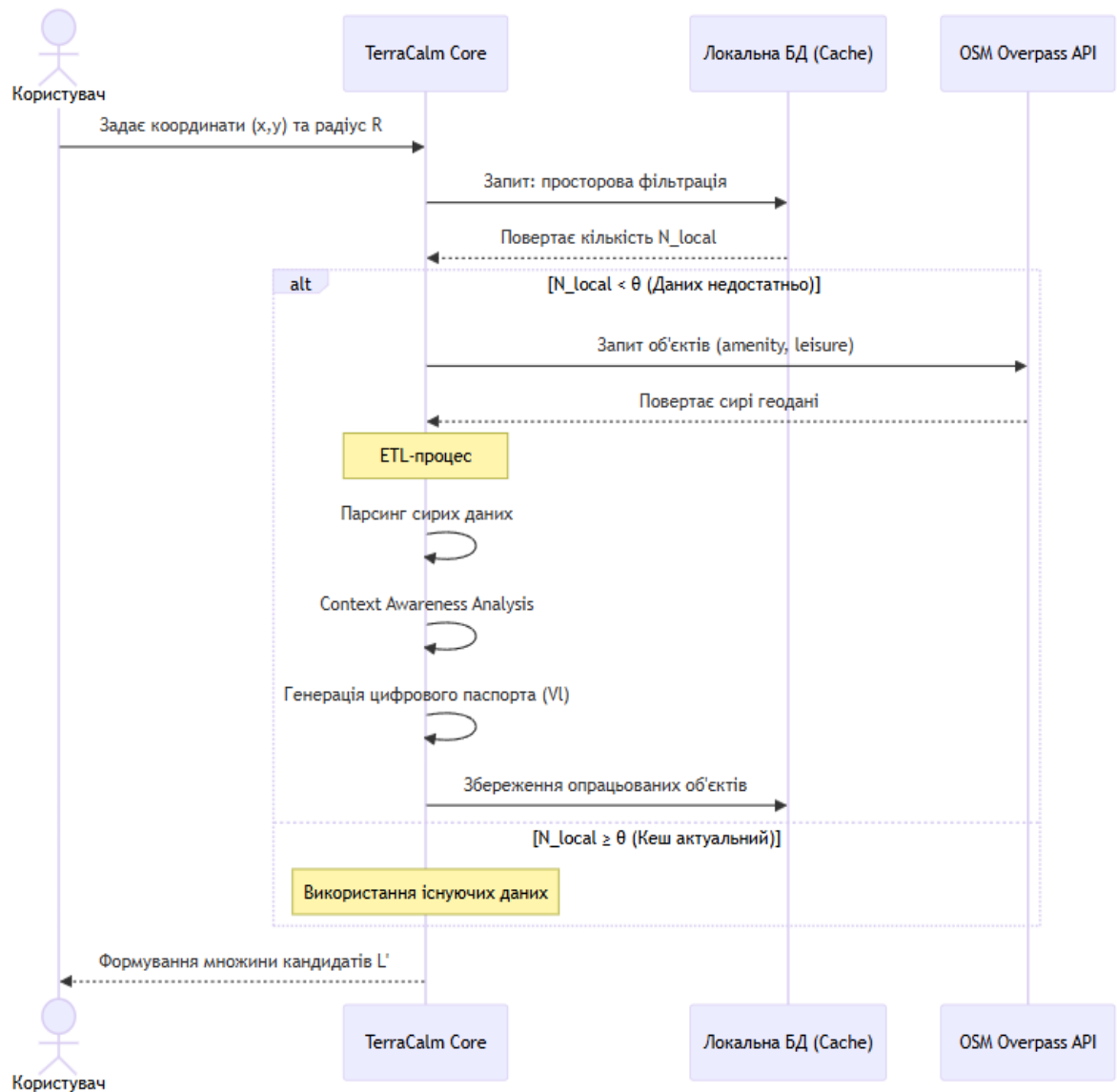


Рисунок 3.2 – UML-діаграма послідовностей (Sequence Diagram) алгоритму динамічного збору просторових даних

У разі активації тригера оновлення, система надсилає асинхронний запит для завантаження просторових об'єктів за ключовими категоріями

інфраструктури: amenity, leisure та tourism. Отримана сира інформація передається на комплексний конвеєр трансформації (ETL-конвеєр). Векторний адаптер виконує послідовний парсинг, контекстний аналіз просторового оточення для кожної нової локації (Context Awareness Analysis), перетворення первинних фізичних полів бази даних V_{db} у нормалізовані координати 12-вимірному цифрового паспорта локації V_l та завершальне збереження оновлених записів. Результатом виконання всього циклу є сформована вихідна множина просторових локацій-кандидатів L' .

Алгоритм формування підсумкової рекомендації. Процес прийняття рішень експертною системою алгоритмізовано у вигляді багатокрокового обчислювального конвеєра. На вхід алгоритму надходять сформований вектор профілю користувача V_u , ситуативний контекст C та вихідна множина локацій L' . Ключовим етапом препроцесингу є застосування функції безпеки $Safety(l, c)$, яка відіграє роль жорсткого фільтра та формує очищену від потенційно небезпечних або закритих об'єктів множину L_{safe} .

Далі система ініціює ітеративний процес розрахунку інтегральної оцінки відповідності $Score(u, l, c)$ для кожної локації з множини L_{safe} . Розрахунок базується на лінійній згортці об'єктивних аналітичних функцій комфорту, безпеки та відновлення з використанням динамічно розрахованих вагових коефіцієнтів та інтеграції бала користувацьких відгуків. Алгоритм не використовує пряме порівняння векторів, що дозволяє більш гнучко балансувати між об'єктивною якістю простору та суб'єктивним запитом. Після завершення обчислень показник нормалізується у відсотках (з жорстким обмеженням у діапазоні від 15% до 99%) і виконується сортування масиву результатів за спаданням релевантності.

Структуру цього обчислювального конвеєра наочно наведено у вигляді діаграми діяльності на рисунку 3.3.

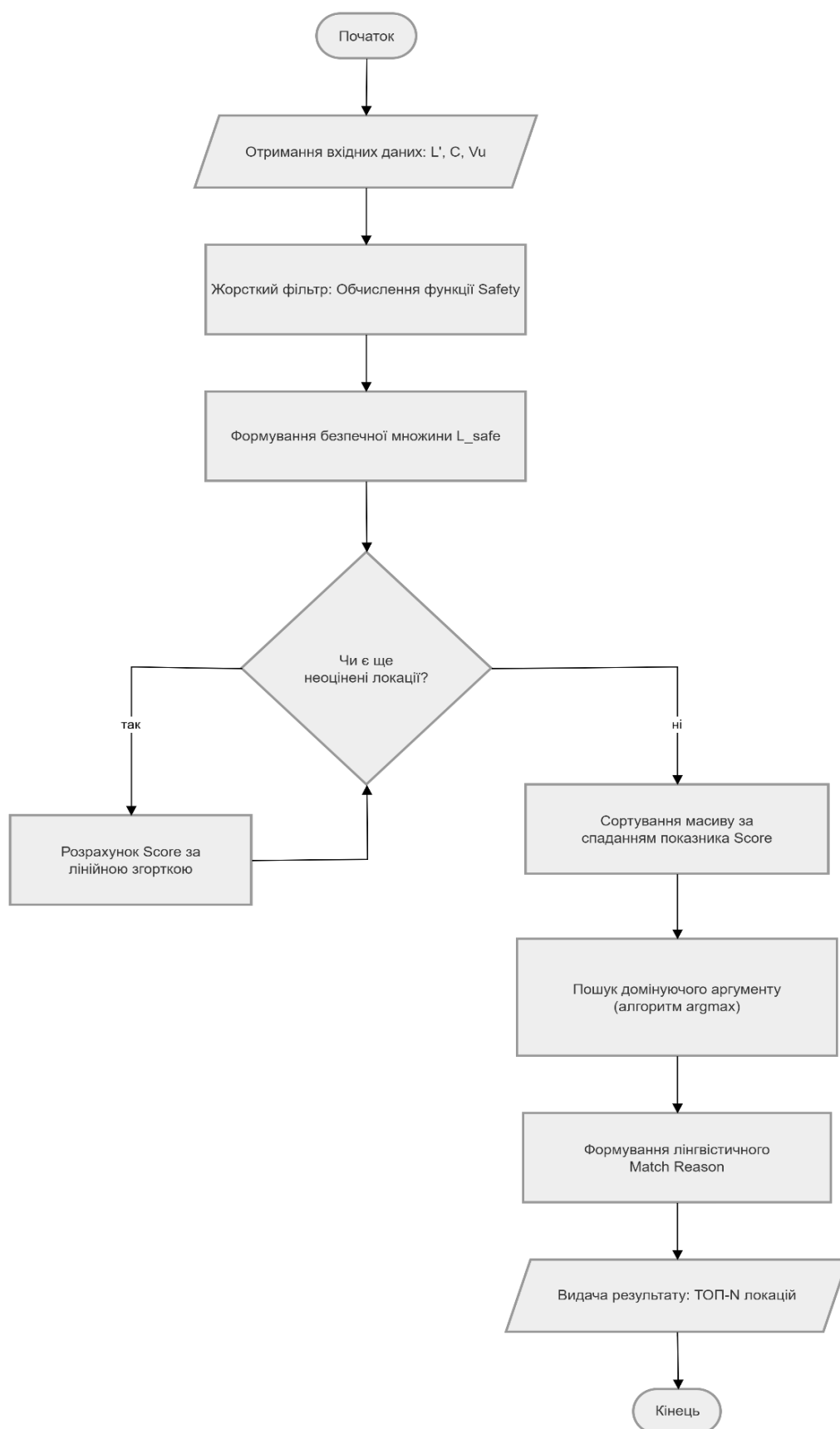


Рисунок 3.3 – UML-діаграма діяльності процесу генерації підсумкової рекомендації

Відранжований список передається на модуль пояснювального штучного інтелекту (XAI) для формування прозорого лінгвістичного обґрунтування відповідності (Match Reason). Завершальним кроком алгоритму є повернення користувачеві структурованого списку ТОП-N локацій із відповідними текстовими поясненнями.

3.6 Модуль генерації пояснень (Explainable AI)

У системах підтримки ментального здоров'я прозорість алгоритмів є критичним фактором, що безпосередньо впливає на рівень довіри користувача (User Trust) та мінімізує відчуття тривожності під час взаємодії з інтерфейсом. Модуль генерації пояснень у системі «TerraCalm» реалізує концепцію «пояснюваного штучного інтелекту» (XAI), перетворюючи абстрактні математичні ваги векторів на зрозумілі лінгвістичні конструкції.

Алгоритм вибору домінуючого аргументу. Процес генерації пояснення базується на аналізі зваженого внеску кожної аналітичної функції та ключових компонент паспорта до підсумкової оцінки релевантності. Математично задача вибору домінуючих аргументів зводиться до визначення індексів характеристик, які мають максимальний зважений вплив у структурі гібридного оцінювання:

$$\{i_1^*, i_2^*\} = \operatorname{argtop}2_i(\operatorname{Metric}_i \times W_i), \quad (3.11)$$

де Metric_i – значення відповідної інтегральної характеристики простору (комфорт, безпека, відновлювальний потенціал);

W_i – динамічна вага цієї характеристики у профілі поточного користувача.

Для підвищення точності пояснення система виділяє два найбільш значущі чинники, внесок яких є максимальним для поточної пари «Користувач–Локація».

Система лінгвістичних шаблонів. Після визначення ключових факторів (i^*), модуль звертається до бази знань шаблонів (Knowledge Base of Templates). Кожна метрика з 12-вимірного вектора має набір предикатів, що відповідають різним рівням інтенсивності цієї ознаки простору (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Матриця відображення основних метрик на лінгвістичні шаблони

Метрика простору (i)	Стан високої інтенсивності ($l_i > 0.8$)	Стан низької інтенсивності ($l_i < 0.3$)
quietness	«Високий рівень акустичного спокою»	«Жвава атмосфера з активним міським шумом»
greenery	«Максимальна інтеграція природних елементів»	«Урбаністичний простір з мінімумом зелені»
solitudePotential	«Можливість для повної приватності та усамітнення»	«Відкритий простір з великим потоком людей»
safety	«Високий рівень візуальної безпеки та освітленості»	«Обмежений огляд території та знижена безпека»

Формування підсумкової рекомендації. Підсумкова фраза обґрунтування синтезується шляхом динамічного об'єднання відібраних шаблонів та персоналізованого звернення конвеєра ХАІ.

Наприклад, якщо для ветерана система знайшла лісопарк, де параметри quietness та greenery мають найвищі зважені показники, модуль згенерує таке пояснення: «Ця локація підібрана для вас, оскільки вона поєднує високий рівень акустичного спокою та максимальну інтеграцію природних елементів, що є пріоритетним для вашого відновлення».

Така деталізація дозволяє користувачеві свідомо приймати рішення щодо відвідування рекреаційної зони, повністю розуміючи причинно-наслідкову логіку алгоритму рекомендацій, що може підвищити рівень довіри користувача до системи та сприяти ефективнішому використанню її рекомендацій.

3.7 Алгоритмічна анонімізація та математична обфускація геоданих

Для захисту приватності пересувань користувача в системі «TerraCalm» розроблено математичну модель обфускації (просторового маскування координат), яка запобігає витоку точних координат під час звернення до зовнішніх картографічних сервісів (OpenStreetMap, Overpass API). Математична логіка анонімізації базується на двох механізмах: просторовому шумі та сітковій агрегації.

Метод додавання просторового шуму (Coordinate Shifting). Перед відправкою запиту до зовнішнього API точна позиція користувача (x , y) трансформується шляхом додавання випадкового вектора зміщення Δ . Математично цей процес описується як:

$$x' = x + r * \cos(\theta), \quad (3.12)$$

$$y' = y + r * \sin(\theta), \quad (3.13)$$

де r – випадкова величина у межах радіуса 100–200 метрів;

θ – випадковий кут у діапазоні $[0, 2\pi]$.

Це забезпечує достатній рівень просторової невизначеності, щоб зовнішній сервер не міг ідентифікувати точну адресу перебування особи.

Алгоритм сіткової анонімізації (Grid-based requests). Для посилення захисту система використовує підхід заміни точкового запиту на площинний. Замість передачі конкретних координат пристрою, алгоритм формує запит для цілого квадрата (bounding box) зі стороною 50 метрів, центром якого є обфускована точка (x' , y').

Координати користувача підміняються центром квадратної сітки, що дозволяє отримати необхідні дані про інфраструктуру району, не розкриваючи фактичного місцеперебування суб'єкта. Цей метод унеможливорює проведення атак типу «Location Tracking» (відстеження

переміщення), оскільки кожен наступний запит під час руху користувача буде прив'язаний до нових вузлів сітки з випадковим зміщенням.

Такий математичний підхід до обфускації дозволяє системі отримувати семантичні теги та відгуки про локації у межах активного радіуса, зберігаючи при цьому повну етичну та цифрову безпеку для вразливих груп населення.

3.8 Об'єктно-орієнтоване проєктування та UML-моделювання системи

Для забезпечення цілісності архітектури та стандартизації розробки було проведено об'єктно-орієнтований аналіз системи. Візуалізація статичної структури компонентів виконана за допомогою діаграми класів (Class Diagram) мови моделювання UML.

Аналіз показав, що центральним елементом системи є клас Location, який через відношення композиції агрегує в собі спеціалізовану сутність DigitalPassport. Така структурна декомпозиція дозволяє ефективно відокремити фізичні атрибути простору (географічні координати, адресу) від його психоемоційного та терапевтичного профілів.

З точки зору інженерії програмного забезпечення, цей підхід реалізує принцип єдиної відповідальності (SRP). Ізоляція базової картографічної логіки від математичних моделей оцінки середовища суттєво підвищує масштабованість системи та спрощує її модульне тестування.

Запропонована модель класів забезпечує високу гнучкість при інтеграції нових типів даних про навколишнє середовище, оскільки внесення змін до психологічного профілю не потребує рефакторингу картографічного ядра. Це дозволяє системі динамічно адаптуватися до різних географічних контекстів та специфічних запитів цільових груп без втрати цілісності базової структури. Крім того, виокремлення обчислювальних модулів, зокрема аналізатора природної мови та

експертної системи, в незалежні класи гарантує слабку зв'язність (low coupling) компонентів. Таке архітектурне рішення створює надійний об'єктно-орієнтований фундамент для подальшої програмної реалізації прототипу, мінімізуючи ризики виникнення конфліктів на етапі написання коду.

Логічну структуру інтелектуального ядра наочно відображено на рисунку 3.4.

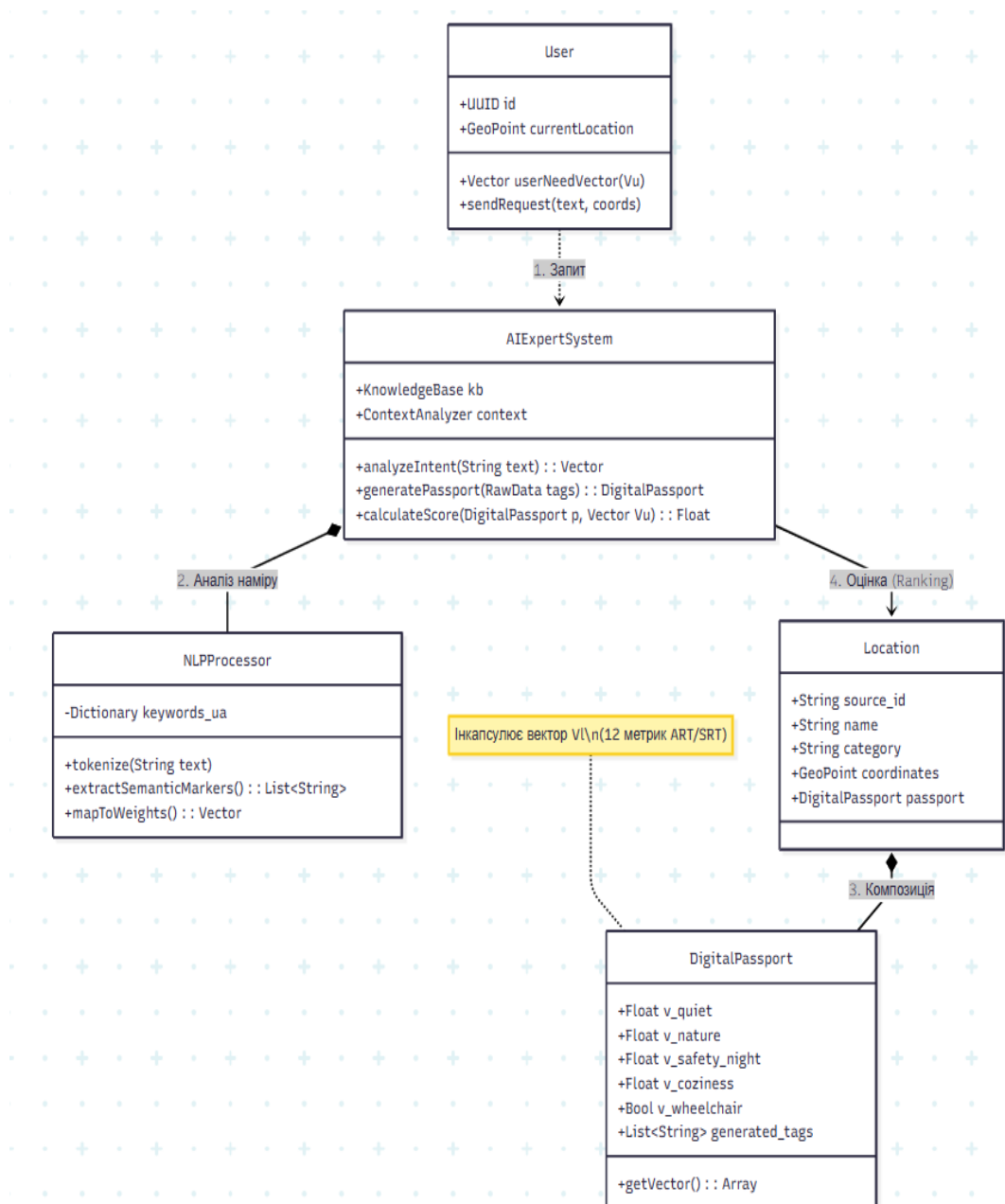


Рисунок 3.4 – Діаграма класів інтелектуальної підсистеми TerraCalm

Ключові класи системи:

- AIExpertSystem – клас-координатор (патерн «Facade»), що надає єдиний інтерфейс до логіки ранжування;
- DigitalPassport – клас-контейнер для 12-вимірного вектора V_l . Його наявність дозволяє системі абстрагуватися від джерела даних (OSM, Google Maps, ручне введення) і працювати з уніфікованою моделлю відновлення;
- NLPProcessor – відповідає за перетворення неструктурованого тексту на структурований вектор ваг V_u .

Моделювання векторного простору. Для демонстрації роботи математичної моделі, запропонованої у підрозділі 3.2, наведено графічну інтерпретацію «Цифрового Паспорта» (рисунок 3.5).

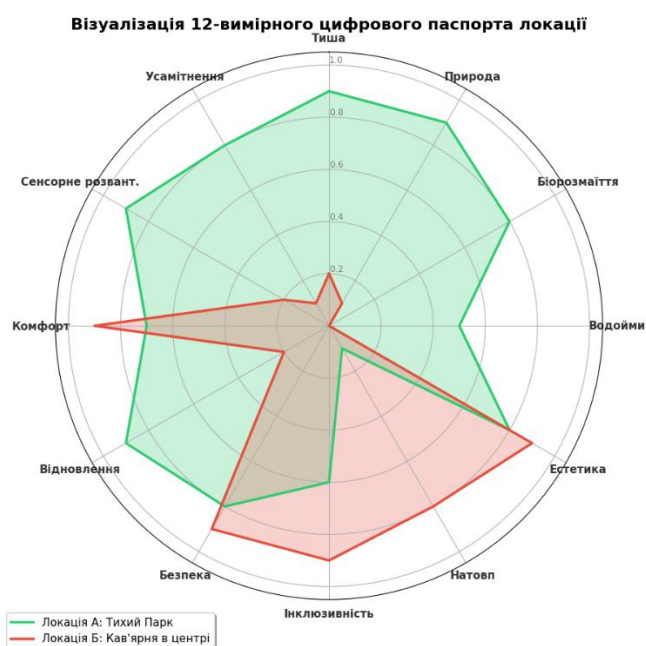


Рисунок 3.5 – Візуалізація 12-вимірного вектора для двох типів локацій

Рисунок 3.5 демонструє порівняльний аналіз 12-вимірних цифрових паспортів двох контрастних міських локацій («Тихий парк» та «Кав'ярня в центрі»). Використання пелюсткової діаграми (Radar Chart) дозволяє наочно оцінити розбіжності у значеннях семантичних вимірів простору та візуалізувати переваги кожної зони.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ TERRACALM

Четвертий розділ кваліфікаційної роботи присвячено практичній реалізації, програмній інженерії та тестуванню розробленої системи рекомендації відновлювальних просторів «TerraCalm».

Враховуючи вимоги до розробки та необхідність тестування ключових алгоритмів, для демонстрації працездатності системи було прийнято рішення про створення повнофункціонального прототипу у вигляді односторінкового веб-застосунку (Single-Page Application, SPA). Метою реалізації прототипу є програмне відтворення математичного алгоритму пошуку релевантних локацій (спроєктованого у розділі 3), верифікація логіки модуля пояснювального штучного інтелекту (XAI) та тестування користувацького інтерфейсу. Для забезпечення автономності застосунку серверну інфраструктуру та базу даних було зімітовано на стороні клієнта, що дозволило інкапсулювати основну обчислювальну логіку в межах браузера.

4.1 Вибір технологій та програмних засобів

Технологічний стек клієнтської частини системи формувався з урахуванням вимог до компонентної архітектури, швидкодії інтерфейсу та можливості автономної роботи прототипу. У результаті було обрано такі програмні засоби:

– frontend-фреймворк: React 18. Ядром клієнтської частини системи обрано бібліотеку React. Її використання дозволяє будувати інтерфейс на основі незалежних компонентів та ефективно керувати станом застосунку. Зміна профілю користувача або параметрів фільтрації автоматично ініціює перерахунок рейтингу локацій та оновлення списку без перезавантаження сторінки;

– мова програмування: JavaScript (ES6+). Систему реалізовано з використанням сучасного стандарту JavaScript. Наявні синтаксичні можливості (деструктуризація об'єктів, стрілкові функції, модульність) дозволяють лаконічно реалізувати алгоритми векторної алгебри та обробки тексту без залучення додаткових інструментів компіляції;

– інструмент збирання: Vite. Для збирання проєкту та організації середовища розробки використано інструмент Vite. Завдяки використанню нативних ES-модулів браузера, він забезпечує швидкий запуск локального сервера та миттєве гаряче оновлення модулів (HMR), що скорочує час розробки та налаштування алгоритмів;

– стилізація: Tailwind CSS. Візуальне оформлення реалізовано за допомогою utility-first фреймворку Tailwind CSS. Такий підхід дозволив відмовитися від написання окремих каскадних таблиць стилів та забезпечує високу гнучкість у створенні адаптивного дизайну для мобільних та десктопних екранів;

– картографічна бібліотека: Leaflet. Відображення інтерактивної карти реалізовано за допомогою відкритої бібліотеки Leaflet та її React-обгортки react-leaflet. Як джерело картографічних даних використано тайли CartoDB Voyager на базі OpenStreetMap, оскільки ліцензія дозволяє комерційне використання та не потребує API-ключів. Для оптимізації рендерингу великої кількості точок підключено модуль кластеризації маркерів;

– шар збереження даних: Web Storage API. З метою уникнення залежності від зовнішніх серверів у прототипній версії, збереження даних (бази локацій, профілів користувачів та їхньої історії) реалізовано через localStorage браузера. Взаємодія з цим сховищем здійснюється централізовано через механізм React Context API;

– допоміжні бібліотеки. Для маршрутизації застосовано бібліотеку react-router-dom, що забезпечує навігацію та захист приватних маршрутів (наприклад, сторінки профілю). Плавні анімації інтерфейсу

реалізовані за допомогою framer-motion, а візуальні іконки інтегровані через пакет lucide-react.

Зазначений стек технологій дозволив створити застосунок із мінімальними зовнішніми залежностями, що забезпечує автономну роботу без серверної інфраструктури та успішно виконує функції демонстраційного застосунка для алгоритмів TerraCalm.

4.2 Реалізація архітектури системи

Система «TerraCalm» реалізована як Single-Page Application (SPA) – односторінковий застосунок, у якому весь цикл навігації та обробки даних відбувається динамічно, без перезавантаження сторінки. Клієнтська маршрутизація обслуговується бібліотекою React Router 6, а весь стан системи інкапсульований у єдиному глобальному контексті AppContext.

Організація директорій проєкту. Кореневий каталог проєкту містить конфігураційні файли середовища збирання (package.json, vite.config.js, tailwind.config.js, postcss.config.js), файл точки входу index.html та основну директорію вихідного коду src/. З метою дотримання архітектурного патерну розділення відповідальностей директорія src/ має суворий функціональний поділ на піддиректорії:

- components/ – презентаційний шар (компоненти інтерфейсу користувача, такі як карта, діаграми та загальні UI-елементи);
- pages/ – компоненти сторінок застосунку, що відповідають за логіку конкретних маршрутів;
- context/ – шар керування глобальним станом програми;
- utils/ – внутрішній обчислювальний контур (математичні алгоритми, модулі лінгвістичного аналізу та ранжування);
- data/ – статичні ресурси та бази знань (словники лем, стандартні конфігурації та терапевтичні сценарії).

Повну ієрархічну структуру файлової системи проєкту із деталізацією всіх вкладених програмних модулів, сторінок та утиліт наочно представлено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Ієрархічна структура директорій та програмних модулів вихідного коду проєкту TerraCalm

Точка входу та кореневий компонент. Файл `src/main.jsx` є технологічною точкою входу програми. Він монтує кореневий React-компонент у DOM-елемент з ідентифікатором `root`, використовуючи оптимізований API фреймворку React 18 `createRoot`. Кореневий компонент `App.jsx` інкапсулює застосунок у два провайдери: `AppProvider` (керування глобальним станом) та `BrowserRouter` (забезпечення клієнтського роутингу).

Усередині маршрутизатора оголошено ієрархічне дерево маршрутів за допомогою компонентів `Routes` та `Route`. Маршрути, що вимагають обов'язкової автентифікації, захищені компонентом вищого порядку `ProtectedRoute`, який за відсутності активної сесії користувача виконує переспрямування на сторінку входу. Адміністративний маршрут `/admin` реалізує додаткову перевірку авторизаційних прав доступу на основі значення поля `role` у профілі поточного користувача.

Глобальний контекст `AppContext`. `AppContext` виконує роль централізованого менеджера стану. Він надає компонентам доступ до таких операцій із даними: `login`, `register`, `loginAsGuest`, `logout`, `setProfile`, `toggleFavorite`, `addHistory`, `addReview`, `getLocationsDB`, `updateLocationInDB`, `getAllUsers`.

При первинній ініціалізації компонент `AppProvider` виконує автоматичну синхронізацію з локальним сховищем `localStorage`. Система перевіряє наявність масивів користувачів та локацій і, за умови їх відсутності, відновлює базову структуру даних зі статичних файлів `DEMO_USERS` та `locations` (які проходять попередню трансформацію через Векторний Адаптер). Стан поточного авторизованого користувача (`currentUser`) зберігається за допомогою хука `useState`, а будь-яка його модифікація автоматично ініціює збереження оновленого JSON-рядка у `localStorage` через хук `useEffect`.

Компонент `Layout` та навігація. Загальна оболонка застосунка (хедер, нижня навігаційна панель) реалізована у компоненті `Layout.jsx`. Він

рендерить різні варіанти навігації залежно від ролі користувача: для адміністратора відображається бокова панель із посиланнями на адмін-дашборд, карту та сторінку методології; для звичайного користувача – горизонтальне меню в хедері на десктопних екранах і фіксована нижня панель на мобільних.

Життєвий цикл та конвеєр обробки даних. Обробка запиту користувача відбувається послідовно у п'ять етапів:

- етап автентифікації та ініціалізації сесії. Користувач взаємодіє зі сторінкою LoginPage, де вводить облікові дані або обирає режим гостьового доступу. Виклик функції login() із ApplicationContext виконує пошук відповідного запису у сховищі localStorage і при успішній верифікації встановлює об'єкт користувача у глобальний стан системи;

- етап збору семантичного запиту (онбординг). Система автоматично перенаправляє користувача (якщо в його профілі відсутній активний вектор потреб) на сторінку OnboardingPage, де надається інтерфейс для введення опису поточного психоемоційного стану вільним текстом природної мови;

- етап лінгвістичного аналізу та векторизації. Після активації процесу аналізу клієнтська функція processTextToVector() виконує токенизацію, стемінг і контекстну модифікацію тексту, повертаючи точний 12-вимірний вектор індивідуальних потреб V_u . Сформований профіль записується у полі recoveryProfile поточного користувача через метод setProfile() та дублюється в localStorage;

- етап просторового ранжування. Сторінка MapPage зчитує вектор V_u з глобального стану та за допомогою оптимізаційного хука useMemo ініціює обчислювальне ядро calculateMatch(). Функція розраховує інтегральний показник релевантності на основі адаптивної багатокритеріальної згортки між V_u та цифровим паспортом V_l кожної локації, формуючи відсортований за спаданням масив із підсумковим показником MatchScore;

- етап мультимодального відображення результатів. Сторінка MapPage реалізує макет із розділеним екраном (split-view). Ліва панель

відображає рейтинговий список карток локацій, збагачений емпатичними поясненнями модуля Explainable AI (XAI), тоді як права панель рендерить інтерактивний шар карти Leaflet із кластеризованими маркерами знайдених просторів. При переході на сторінку LocationPage користувач отримує розгорнуту інформацію про об'єкт, включаючи пелюсткову RadarChart діаграму відповідності векторів і форму відгуку.

Для детального розуміння логіки функціонування системи, динаміку інформаційної взаємодії та хронологію обміну повідомленнями між її ключовими компонентами під час послідовного виконання п'яти описаних етапів наочно проілюстровано на UML-діаграмі послідовностей (рисунок 4.2).

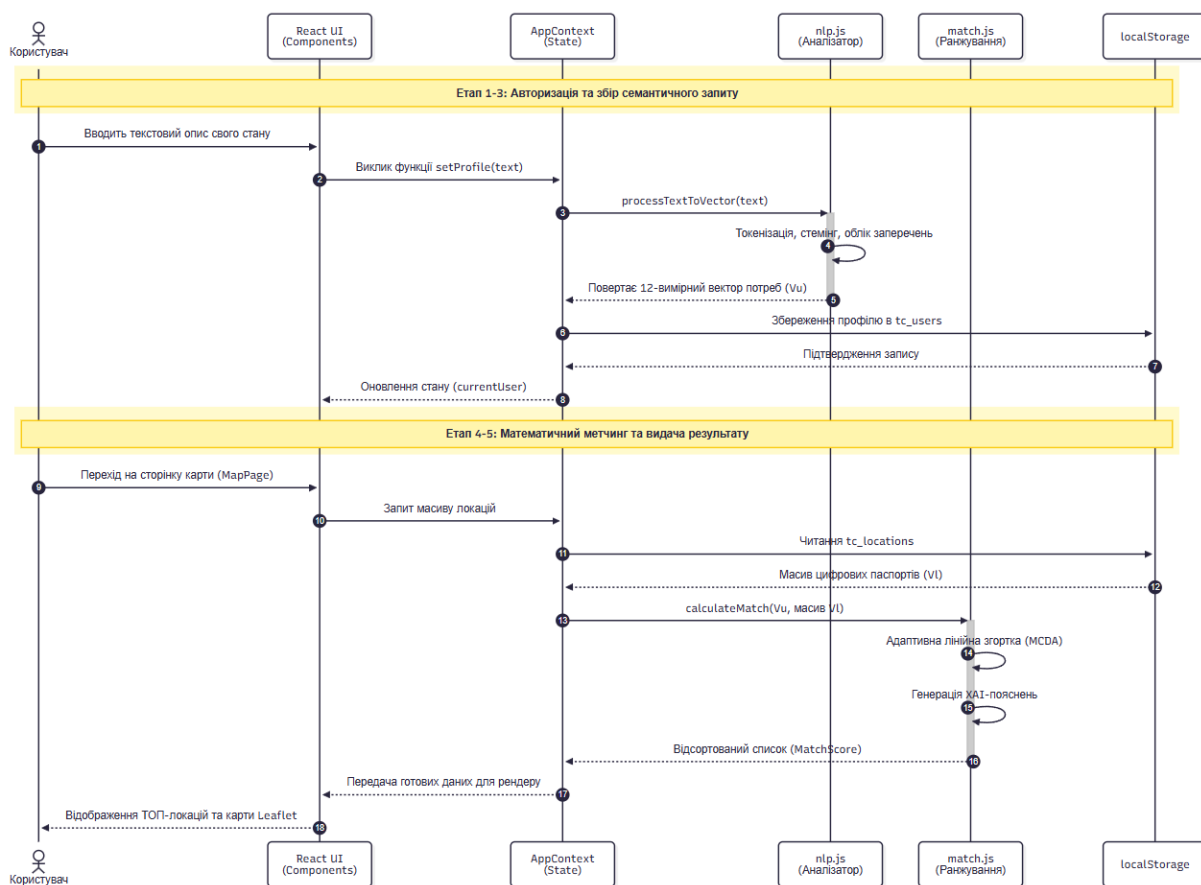


Рисунок 4.2 – UML-діаграма послідовностей (Sequence Diagram) життєвого циклу обробки запиту користувача

Вона відображає синхронні та асинхронні виклики між користувацьким інтерфейсом, глобальним менеджером стану, обчислювальними утилітами та локальним сховищем даних.

4.3 Реалізація модуля аналізу потреб користувача

Модуль аналізу потреб користувача є центральним інтелектуальним компонентом системи TerraCalm. Він реалізований у файлі `src/utils/nlp.js` і відповідає за перетворення неструктурованого тексту природної мови на 12-вимірний числовий вектор потреб V_u , придатний для математичного порівняння з паспортами локацій.

Використання глибоких моделей обробки природної мови (Deep NLP) на базі архітектури Transformer або великих мовних моделей (LLM) винесено за межі обсягу розробки поточного MVP-прототипу. Це зумовлено їхніми високими вимогами до обчислювальних ресурсів (відповідно до 2.6), що суперечить концепції автономного клієнтського застосунку (SPA), який працює безпосередньо у браузері користувача.

У поточному прототипі конвеєр обробки природної мови (NLP-pipeline) максимально оптимізовано: замість важких серверних бібліотек використано легковаговий клієнтський алгоритм лексико-семантичного зіставлення (Lexical Matching) ключових маркерів із вагами. Таке рішення забезпечує достатню точність фільтрації локацій для MVP-версії за мінімального споживання ресурсів пристрою.

Форма введення запиту. Інтерфейс збору запиту реалізовано на сторінці `OnboardingPage`. Вона містить текстове поле (`textarea`) із підказкою та кнопку для запуску аналізу. Мінімальна допустима довжина тексту становить 5 символів – введення меншої довжини не обробляється. Додатково на сторінці розміщено три кнопки швидкого вибору («Хочу очистити голову серед дерев», «Потрібно посидіти в тиші», «Емоційне виснаження»), клік на які автоматично заповнює поле та ініціює

аналіз (рисунок 4.3). Для покращення сприйняття процесу аналізу реалізовано анімований екран із послідовним відображенням трьох текстових фаз, що відповідають етапам обробки запиту.

The image shows a mobile application interface for 'TerraCalm AI'. At the top, there is a logo with a star icon and the text 'TerraCalm AI'. Below the logo is the main heading 'Як ви себе почуваєте?' (How do you feel?). Underneath the heading is a descriptive text: 'Опишіть свій стан та побажання вільним текстом. Наш алгоритм зрозуміє контекст і підбере локації для ідеального відновлення.' (Describe your state and wishes in free text. Our algorithm will understand the context and select locations for ideal recovery). There is a large text input area with a light blue background. Inside this area, there is an example text: 'Наприклад: 'Дуже втомилася після роботи, хочу знайти тихе місце біля води без людей, щоб побути на самоті...'' (For example: 'I'm very tired after work, I want to find a quiet place near water without people, to be alone...'). To the right of the input area is a microphone icon. Below the input area, there is a character count '0 СИМВОЛІВ' (0 CHARACTERS) and a dark grey button labeled 'Аналізувати →' (Analyze →). Below the button, there is a section titled 'ПРИКЛАДИ ЗАПИТІВ:' (EXAMPLES OF REQUESTS:). Under this title, there are three rounded rectangular buttons containing example queries: 'Хочу очистити голову серед дерев" (I want to wash my head among trees), 'Потрібно посидіти в тиші" (I need to sit in silence), and 'Емоційне виснаження" (Emotional exhaustion).

Рисунок 4.3 – Інтерфейс введення запиту користувача

Нормалізація та токенизація тексту. Перший крок обробки – приведення тексту до нижнього регістру та видалення всіх символів, що не є буквами кирилиці або пробілами (регулярний вираз `/[^\w\sа-яієїґ]/gi`). Отриманий текст розбивається на токени – окремі слова – методом `split(/\s+/)`. Порожні рядки, що можуть виникнути у результаті розбиття, фільтруються за допомогою `filter(Boolean)`. У підсумку маємо масив ізольованих лексичних одиниць.

Словник стемів та семантичних вимірів. Лексичний аналіз реалізовано методом зваженого пошуку стемів (відповідно до 3.5) [20]. Константа `DICTIONARY` містить 12 семантичних вимірів (відповідно до 3.2). Для кожного виміру визначено масив стемів – коротких коренів слів. Збіг перевіряється через метод `token.startsWith(stem)` для стемів до 3 символів та `token.includes(stem)` для більших, що реалізує просту стемізацію без морфологічного аналізатора. Такий підхід дозволяє розпізнавати морфологічні варіанти одного слова: «тиша», «тиші», «тишою» однаково містять стем «тиш».

Модифікатори та контекстуальний аналіз. Логіка модуля враховує лінгвістичний контекст через константу `MODIFIERS`, яка містить три типи лексичних модифікаторів:

- підсилювачі (`intensifiers`) збільшують вагу знайденого виміру: «дуже» та «сильно» дають множник 1.5, «максимально» та «надзвичайно» – 2.0;
- послаблювачі (`diminishers`) знижують вагу: «трохи», «злегка» – 0.5, «ледь» – 0.4;
- заперечення (`negations`) є масивом слів, що інвертують семантику наступного токена: «без», «не», «мало», «уник», «жодн» тощо.

Алгоритм для кожного токена перевіряє попередній і передпопередній токени на належність до масиву `negations`. При виявленні заперечення перед ключовим словом логіка інвертується: наприклад, «без натовпу» збільшує `solitudePotential` та знижує `crowdLevel` замість їх підвищення.

Побудова вектора потреб і крос-впливу вимірів. Початковий стан вектора V_u ініціалізується мінімальними базовими значеннями для більшості вимірів (0.15) та помірними значеннями для `crowdLevel` і `safety` (0.5), що відображає статистичний «нейтральний» запит без специфічних переваг. При знаходженні кожного збігу з відповідною компонентою вектора додається вага $0.4 \times \text{currentMultiplier}$. Після

оновлення основного виміру викликається допоміжна функція `applyCrossImpact()`, яка реалізує семантичні крос-зв'язки між вимірами: наприклад, активація `greenery` автоматично підвищує `biodiversity`; активація `waterPresence` підвищує `aestheticValue` та `restorationPotential`; активація `solitudePotential` знижує `crowdLevel` до мінімуму. Окремо обробляються токени, пов'язані з кав'ярнями («кав», «чашк», «напій»): при їхньому виявленні значення `aestheticValue` та `sensoryRelief` підвищуються, а значення `greenery` та `waterPresence` знижуються, забезпечуючи пріоритет закладів у результатах пошуку для таких запитів. На завершальному кроці всі компоненти вектора нормалізуються у діапазон $[0.15, 1.0]$ за допомогою `Math.min` та `Math.max`.

4.4 Реалізація механізму рекомендацій

Механізм рекомендацій системи TerraCalm програмно реалізований у двох взаємопов'язаних модулях: `src/utils/match.js` (обчислення релевантності та генерація пояснень) та `src/utils/VectorAdapter.js` (перетворення вхідних даних локацій в уніфікований векторний простір).

Модель локацій та цифровий паспорт. Кожна локація у базі даних системи представлена об'єктом-записом із такими полями: `id` (унікальний ідентифікатор), `name` (назва), `type` (тип), `district` (район міста), `address` (адреса), `lat` та `lng` (географічні координати WGS84), `image` (URL зображення), `isApproved` (статус модерації), `feedback_score` (середній бал від 0.0 до 5.0), `scenario` (об'єкт із терапевтичним сценарієм) та `passport`.

Вкладений об'єкт `passport` є 12-вимірним вектором (див. формулу 3.1), де ключі суворо відповідають вимірам вектора користувача. Усі компоненти паспорта програмно нормалізовані у діапазоні $[0.0, 1.0]$.

Векторний адаптер (ETL-конвеєр). Функція `normalizeLocationTo12D()` у файлі `VectorAdapter.js` забезпечує уніфікацію просторових даних, що

надходять із різних джерел. Деякі сирі локації (зокрема у файлі `mockLocations.js`) зберігають вихідні дані у форматі числових значень за шкалою 1–10 (`quiet`, `privacy`, `cozy`, `nature`) та булевих індикаторів (`outdoor`, `pet`, `wheelchair`).

Адаптер виконує програмну нормалізацію: десяткові значення лінійно масштабуються діленням на 10.0, а булеві типи конвертуються у числові еквіваленти (1.0 для `true` та 0.0 для `false`). Ті компоненти 12-вимірнього паспорта, що не мають прямого відповідника у вхідних даних, обчислюються аналітично на рівні коду. Наприклад, вимір біорозмаїття (`biodiversity`) алгоритмічно синтезується як зважена сума наявних показників природи, а сенсорне розвантаження (`sensoryRelief`) розраховується як середнє арифметичне показників акустичного спокою та приватності.

Додатково, контекстна логіка адаптера використовує регулярні вирази для сканування текстових описів локацій на наявність маркерів (`isWater`, `isNature`). Це дозволяє автоматично заповнювати (метод `data imputation`) показники присутності води та зелені для об'єктів без явно заданих значень, забезпечуючи цілісність бази даних перед передачею до модуля ранжування.

Алгоритм адаптивного багатокритеріального ранжування. Програмна реалізація математичної моделі ранжування (MCDA), обґрунтованої у третьому розділі, інкапсульована у модулі `src/utils/match.js`. Центральною точкою обчислень є функція `calculateMatch(loc, userVector)`, яка генерує фінальний рейтинг локації.

Програмний конвеєр функції складається з двох паралельних процесів. По-перше, викликається метод `calculateLocationMetrics()`, який опрацьовує нормалізований паспорт локації та повертає JavaScript-об'єкт із трьома згорнутими показниками: комфортом, безпекою та відновленням. По-друге, метод `determineWeights()` аналізує об'єкт поточних потреб користувача і динамічно генерує об'єкт вагових коефіцієнтів. На рівні коду

реалізовано запобіжник (hardcoded limit), який не дозволяє жодній з ваг опуститися нижче значення 0.15, після чого їхня сума програмно нормалізується до одиниці.

Підсумкова оцінка обчислюється як сума добутків відповідних полів цих двох об'єктів, до якої додається надбавка за колективні відгуки (feedbackBoost). Для фінальної нормалізації результату у відсотках застосовуються стандартні методи Math.min та Math.max, які жорстко обмежують значення MatchScore у безпечному для інтерфейсу діапазоні [15, 99]. Отримане ціле значення повертається до компонента MapPage для сортування загального масиву результатів.

Ранжування та формування списку рекомендацій. На сторінці MapPage обчислення рейтингу інкапсульовано всередині React-хука useMemo, що забезпечує перерахунок лише за зміни вхідних залежностей. Функція виконує ітерацію по масиву локацій, обчислюючи MatchScore для кожної з них, після чого масив сортується за спаданням рейтингу. Додаткова фільтрація застосовується до текстових полів і геолокаційних зон. Лінійний конвеєр проходження даних – від отримання векторів до формування списку рекомендацій – наочно представлено на блок-схемі (рисунок 4.4).

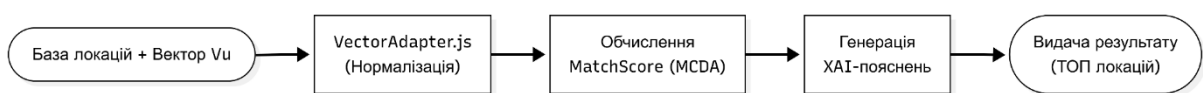


Рисунок 4.4 – Програмний конвеєр алгоритму ранжування та генерації рекомендацій

Модуль поясень (Explainable AI). Через обчислювальні обмеження клієнтського середовища інтеграцію ресурсомістких алгоритмів ХАІ (SHAP, LIME) винесено за межі MVP-прототипу. Натомість реалізовано оптимізований детермінований механізм інтерпретації рекомендацій, що генерує пояснення на основі прямих збігів векторних ваг.

Це забезпечує необхідну UX-прозорість без деградації швидкодії, а впровадження складних XAI-моделей визначено як напрям подальшого розвитку.

Функція `generateExplainableAI(loc, userVector)` реалізує концепцію пояснюваного штучного інтелекту, описану у підрозділі 3.6. Алгоритм фільтрує виміри, де одночасно виконуються дві умови: метрика є важливою для користувача ($V_u > 0.4$) та сильно вираженою в самій локації ($V_l > 0.5$). Відфільтровані параметри сортуються за спаданням зваженого добутку ($V_u \times V_l$), після чого обираються два найзначущі параметри.

Для кожного відібраного виміру система формує пояснювальне речення зі словника `EMPATHETIC_PHRASES`, орієнтоване на психоемоційний стан користувача. Наприклад, для високого показника `quietness` генерується фраза «Глибока тиша допоможе вам зняти сенсорне перевантаження». Ці пояснення інтегруються безпосередньо в інтерфейс користувача (рисунок 4.5).

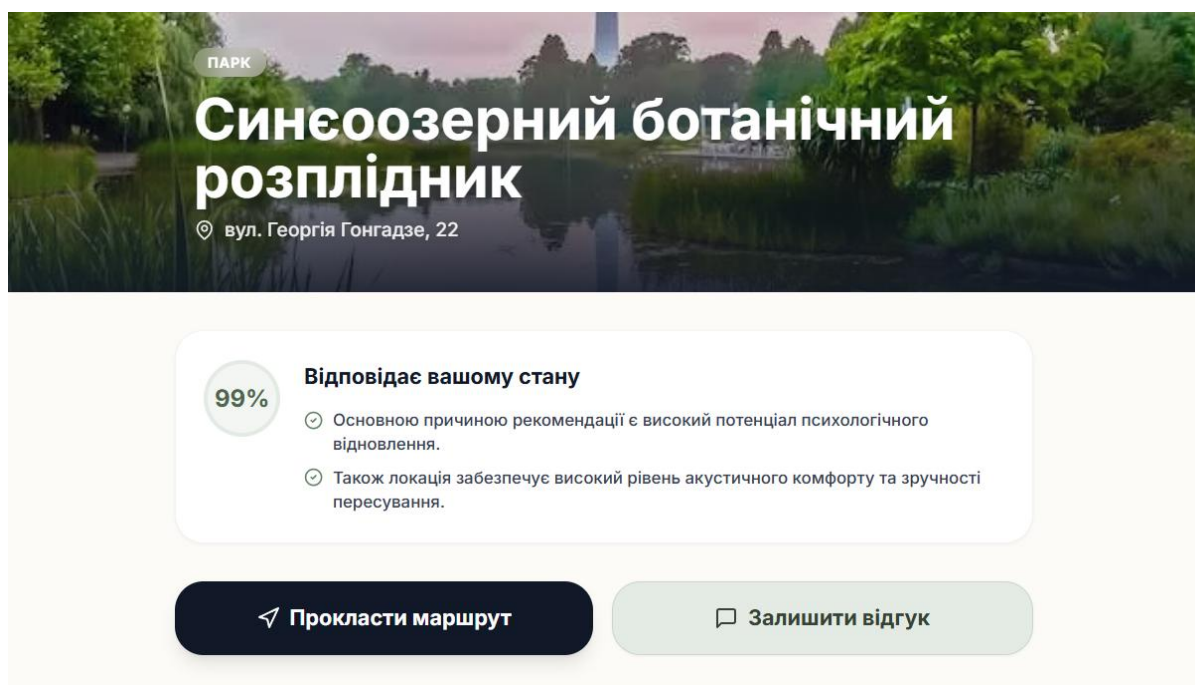


Рисунок 4.5 – Приклад відображення блоку Explainable AI та відсотка збігу на детальній сторінці локації

Відповідно до інтерфейсу, представленого на рисунку 4.5, модуль ХАІ формує текстові обґрунтування, що доповнюють кількісний показник релевантності маршруту. Інформаційний блок відображає логіку роботи алгоритму ранжування із деталізацією факторів середовища, які визначили результат – у наведеному прикладі такими факторами є потенціал психологічного відновлення та акустичний комфорт. Забезпечення прозорості алгоритмічних рішень спрямоване на зниження когнітивного навантаження користувача в процесі вибору маршруту.

4.5 Реалізація клієнтського шару персистентності даних

Шар збереження даних у розробленому прототипі реалізовано у двох форматах: статичні масиви JS-об'єктів у файлах модулів та динамічне сховище `localStorage`. Цей підхід забезпечує відтворюваність демонстраційних сценаріїв та дозволяє тестувати прототип без розгортання серверної частини.

Колекція просторів (`tc_locations`). Основне інформаційне сховище відновлювальних просторів визначено в модулі `src/data/locations.js`. Воно консолідує два масиви об'єктів: `top25Locations` (25 експертно відкаліброваних та верифікованих записів для базових демонстраційних сценаріїв) і масив розширеної вибірки `rawExtendedLocations`, який динамічно опрацьовується функцією `processLocations()`. Для кожного об'єкта з розширеного масиву утиліта автоматично виконує операції нормалізації:

- зчитує вихідні метрики цифрового паспорта, задані за дискретною шкалою 1–10;
- трансформує їх у безперервний інтервал $[0.0, 1.0]$;
- динамічно прив'язує відповідні графічні асети з CDN-репозиторію;
- генерує стандартний об'єкт терапевтичного сценарію (`scenario`).

Завершальна зведена колекція налічує 100 унікальних рекреаційних та урбаністичних локацій міста Києва, що класифіковані за категоріями: парки, ліси, лісопарки, водойми, набережні, сквери, тематичні бібліотеки, кав'ярні з низьким рівнем сенсорного навантаження, ботанічні сади та відкриті громадські простори. У життєвому циклі завантаження застосунка глобальний провайдер `AppProvider` порівнює довжину та контрольні суми масиву у `localStorage` із параметрами статичного файлу `i`, за наявності розбіжностей, виконує оновлення сховища.

Специфікація схеми об'єкта локації. Кожен JSON-об'єкт у колекції `tc_locations` має сувору структуру атрибутів, яка містить такі поля:

- `id`: рядковий унікальний первинний ключ (Primary Key) виду `loc-N`;
- `name`: повна офіційна назва локації;
- `type`: категорія об'єкта (наприклад, «Парк», «Ліс», «Водойма»);
- `district`: адміністративний район міста, приведений до нижнього регістру для оптимізації пошукових індексів;
- `address`: фізична поштова адреса об'єкта;
- `lat`, `lng`: географічні координати у системі WGS84 (числа з плаваючою комою подвійної точності);
- `image`: абсолютний URL-рядок графічного асета;
- `isApproved`: булевий прапор статусу модерації;
- `feedback_score`: інтегральна оцінка за відгуками користувачів (число у діапазоні `[0.0, 5.0]`);
- `scenario`: вкладений об'єкт терапевтичного контенту, що містить текстові поля `title` (назва практики), `story` (опис метафори) та `exercise` (покрокова інструкція для застосування на місці);
- `passport`: об'єкт 12-вимірного цифрового паспорта об'єкта (V_l), ключі якого безпосередньо відповідають вимірам потреб користувача.

Колекція профілів користувачів (`tc_users`). Модуль `src/data/demoUsers.js` визначає масив `DEMO_USERS`, який містить п'ять демонстраційних облікових записів: профіль системного

адміністратора (модератора баз даних) та чотири деталізовані профілі цільових груп користувачів (депресивні стани та вигорання, ВПО з високим рівнем тривожності, ветеран із симптомами ПТСР, студентський стрес).

Кожен запис користувача містить базові авторизаційні атрибути (`id`, `name`, `email`, `password`, `role`), тимчасову мітку реєстрації `created_at` у форматі ISO 8601, а також масиви зв'язків: `favorites` (масив рядкових ідентифікаторів обраних локацій) та `history` (масив об'єктів відвіданих локацій, що фіксує показник відповідності (`matchScore`) та дату відвідування). Ключовим інтелектуальним полем є об'єкт `recoveryProfile`, який містить вихідний сирий текст психоемоційної скарги (`rawText`), розрахований 12-вимірний вектор індивідуальних потреб V_u (vector) та часову мітку векторизації. Під час реєстрації нового клієнта функція `register()` динамічно генерує унікальний ідентифікатор за патерном `user-{timestamp}` та записує оновлений масив у пам'ять браузера.

Сесійне сховище поточного користувача (`tc_current_user`). Для підтримання стану авторизації між сесіями та запобігання втраті даних під час перезавантаження сторінок застосовано механізм сесійної персистентності. Об'єкт поточного користувача записується у `localStorage` під ключем `tc_current_user`. Під час ініціалізації (монтування) компонента застосунка хук `useState` в `AppProvider` виконує десеріалізацію цього ключа. Під час виклику методу `logout()` здійснюється повне очищення сесії через `localStorage.removeItem('tc_current_user')`, що забезпечує безпеку персональних даних.

Інкапсуляція доступу до даних. Пряма маніпуляція зі сховищем `localStorage` у React-компонентів заборонена, щоб уникнути архітектурного хаосу. Усі операції читання, запису та модифікації інкапсульовані в функціях `AppContext`. Методи `getLocationsDB()` та `getAllUsers()` виконують парсинг JSON-рядків у типізовані JavaScript-об'єкти. Операція `updateLocationInDB()` забезпечує інтерфейс модератора можливістю динамічного коригування ваг векторів локацій: функція знаходить у масиві

запис за id, виконує глибоке копіювання, замінює векторні коефіцієнти та серіалізує весь масив назад у сховище.

Логічну структуру сформованої моделі даних, типи полів, структуру вкладених об'єктів та зв'язки між сутностями шару персистентності системи «TerraCalm» наочно представлено на схемі (рисунок 4.6).

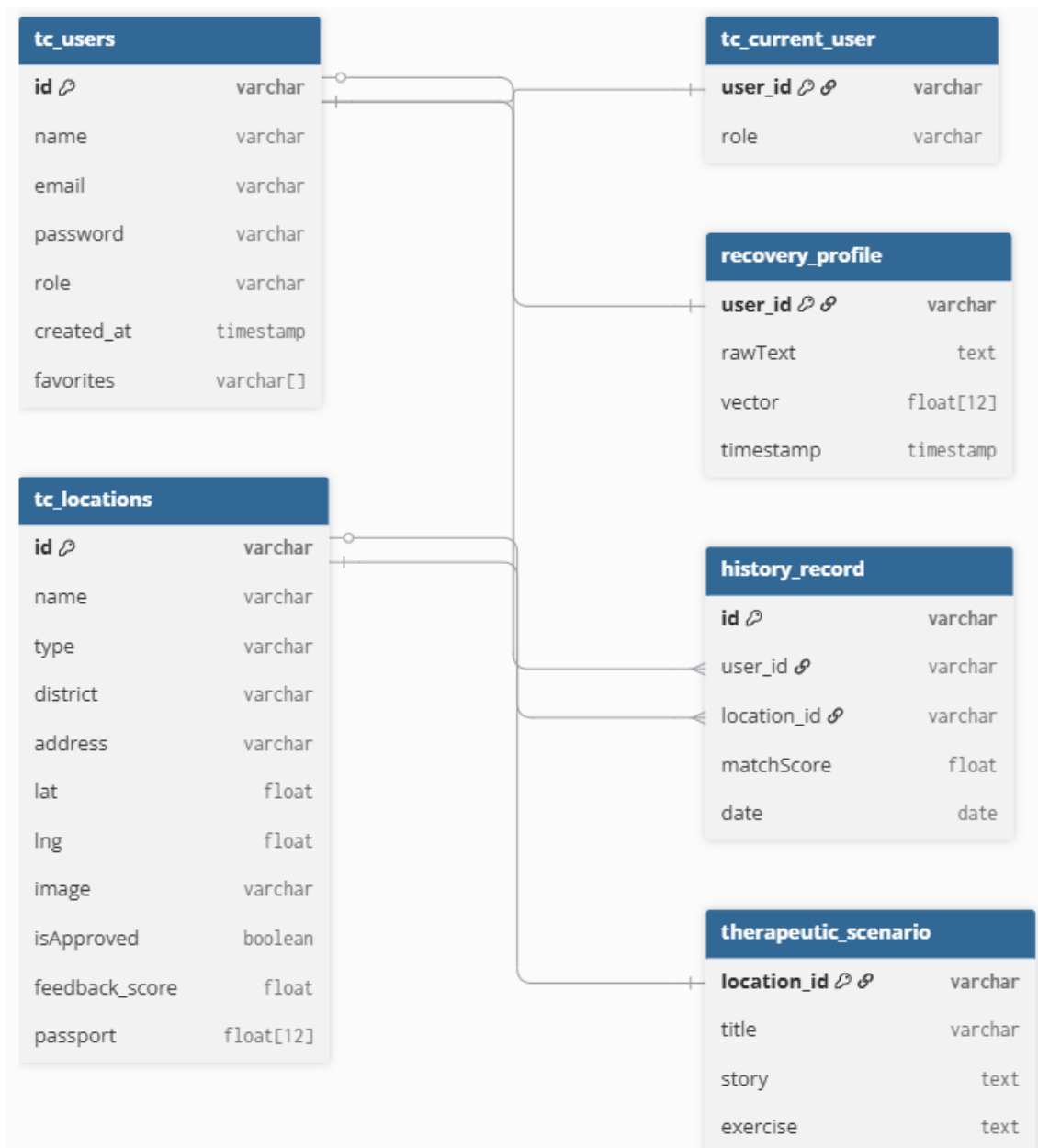


Рисунок 4.6 – Схема логічної структури сховищ даних персистентного шару та зв'язків між об'єктами системи

На схемі відображено зв'язки між сутностями: `tc_users` є центральним вузлом, до якого відносяться `tc_current_user` та `history_record` за принципом «один до одного», тоді як `tc_locations` пов'язана з `history_record` та `therapeutic_scenario`, а перехресна таблиця `history_record` з'єднує обидві основні колекції.

4.6 Реалізація користувацького інтерфейсу

Інтерфейс системи TerraCalm спроектований відповідно до принципів мінімалістичного дизайну та когнітивної ергономіки. Кольорова палітра базується на нейтральних світлих тонах та приглушено-зелених відтінках, що узгоджується з концепцією «природного спокою» та запобігає візуальному перевантаженню. Послідовна система анімацій на базі фізичних моделей руху забезпечує плавні переходи та знижує відчуття різкості під час перемикання сторінок.

Сторінка авторизації (LoginPage). Перша точка взаємодії з користувачем містить логотип, назву системи, стислий опис та елементи навігації. Для кнопок вибору сценарію входу реалізовано послідовну появу елементів (staggered animation) та плавні переходи між станами форм реєстрації та авторизації. Декоративні розмиті елементи фону створюють ефект легкого слява без відволікання уваги від основного функціоналу. Лаконічне посилення внизу сторінки відкриває приховану форму доступу для адміністратора.

Поля форми супроводжуються inline-валідацією з відповідними повідомленнями про помилки, що унеможлиблює відправку некоректних даних. Такий підхід мінімізує кількість кроків, необхідних для входу в систему, та знижує бар'єр першої взаємодії для цільової аудиторії з підвищеним рівнем тривожності (рисунки 4.7).

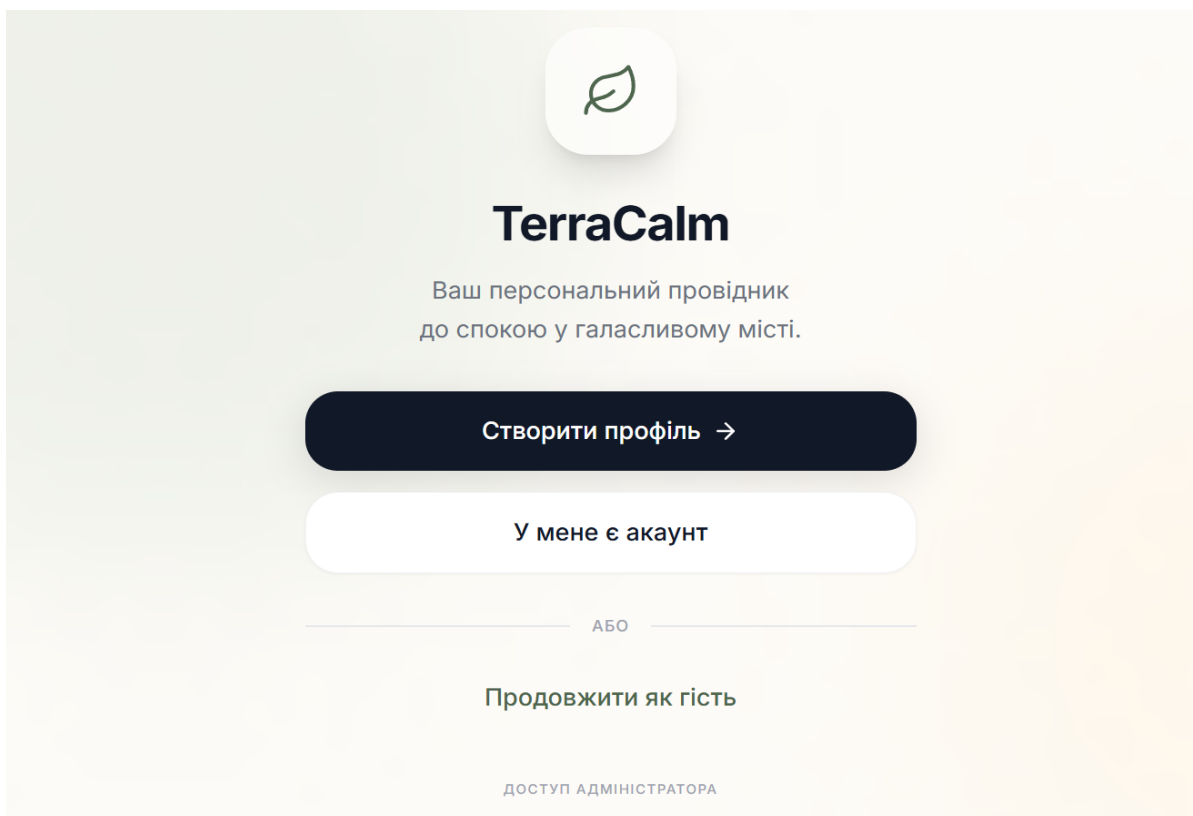


Рисунок 4.7 – Інтерфейс сторінки авторизації та реєстрації користувачів

Головна сторінка карти (MapPage) та MapComponent. Ключовою сторінкою застосунка є MapPage, що реалізує макет із розділеним екраном (split-view): ліва панель фіксованої ширини містить рейтинговий список локацій, а права панель – інтерактивну карту Leaflet. У верхній частині лівої панелі розміщено блок активного NLP-запиту, який візуалізує поточний стан користувача. Нижче інтегровано блок геолокалізації з перемикачем режимів пошуку («Авто» або ручний вибір району). Картки локацій у списку містять зображення, назву, мітку району та блок відповідності із відсотком MatchScore та XAI-поясненнями. Результати з високою релевантністю виокремлюються акцентним кольором.

Групування маркерів на карті виконується за допомогою механізму кластеризації, що запобігає візуальному перевантаженню інтерфейсу при щільному розміщенні точок. Компонент контролера карти динамічно реагує

на зміну активної локації в списку та плавно переміщує фокус до обраних координат (рисунок 4.8).

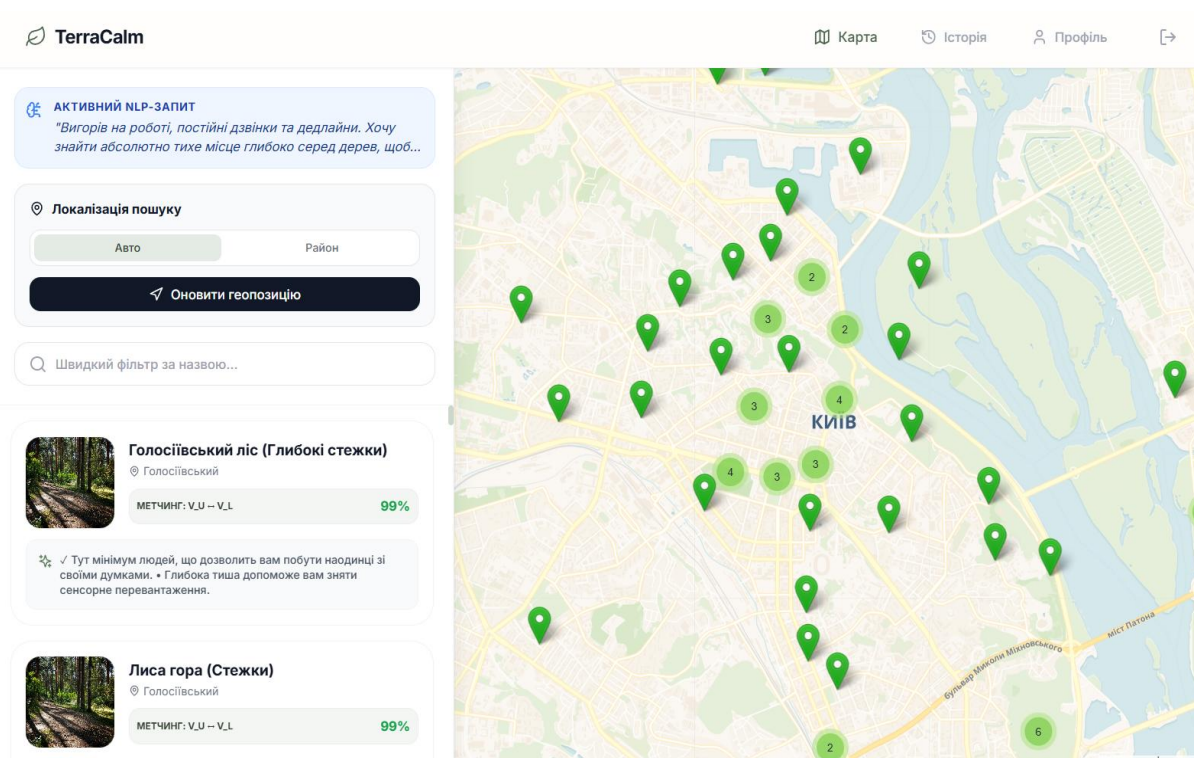


Рисунок 4.8 – Головна сторінка системи з інтерактивною картою та рейтинговим списком рекомендацій

Сторінка деталей локації (LocationPage). Сторінка надає розгорнуту інформацію про обраний об'єкт. У верхній частині розміщено повноекранне зображення з елементами навігації та управління (повернення, поширення, додавання до обраного). Блок відповідності містить інтегральний відсоток збігу та структурований список обґрунтувань модулем Explainable AI. Розділ характеристик відображає ключові виміри середовища у вигляді прогрес-барів. Функціонал сторінки доповнено можливістю зовнішньої маршрутизації та формою зворотного зв'язку для збору емпіричних оцінок (рисунок 4.9).

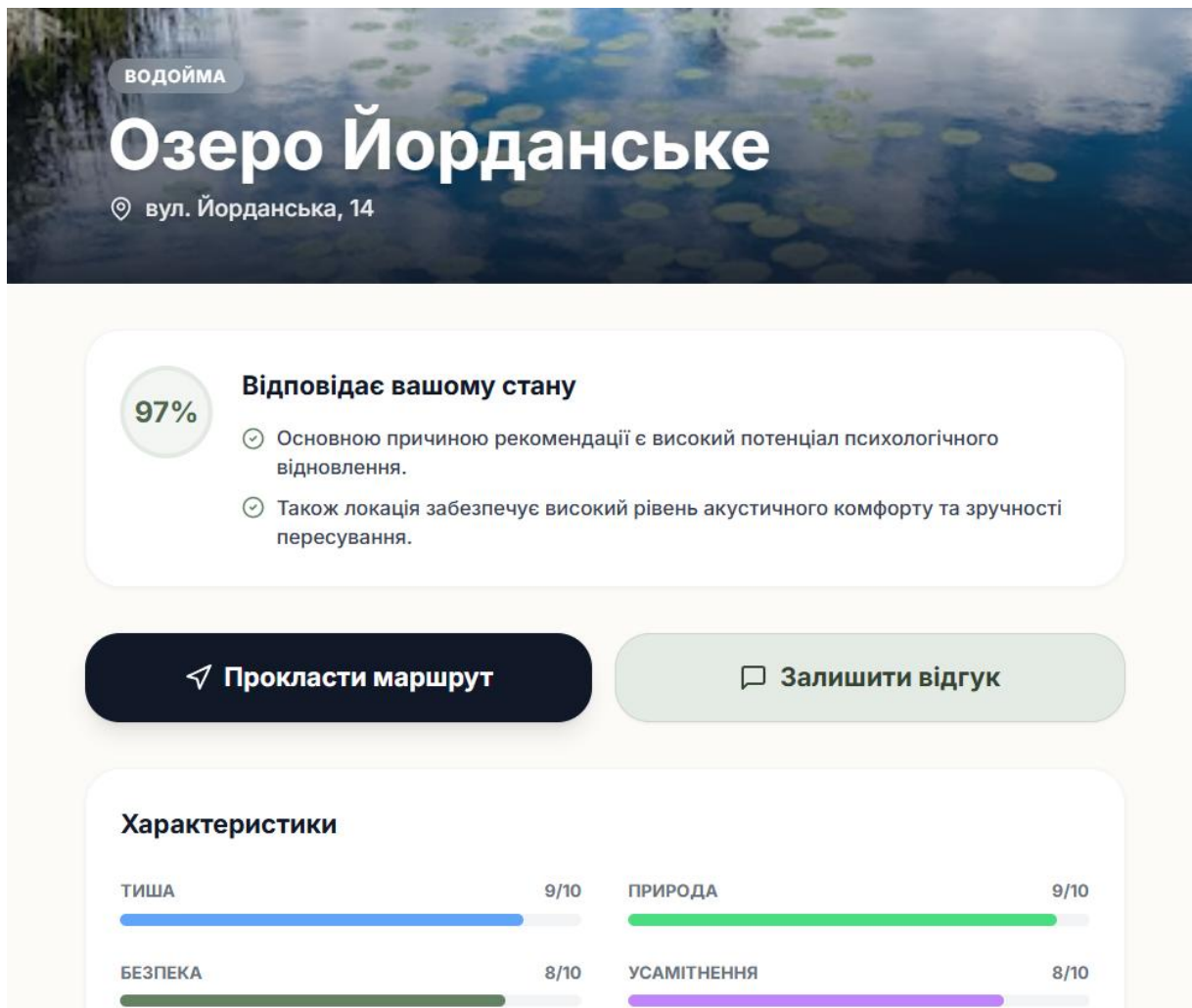


Рисунок 4.9 – Детальна інформація про просторову локацію з елементами пояснювального ІІІ та прогрес-барами характеристик

Адаптивність та UX-рішення. Система повністю адаптована для мобільних пристроїв. На мобільних екранах відображається фіксована нижня навігаційна панель, на десктопних – горизонтальне меню. Для покращення тактильного відгуку впроваджено мікроінтеракції масштабування активних елементів. Система сповіщень реалізована через спливаючі повідомлення з автоматичним приховуванням. Для обробки зображень реалізовано механізм «м'якої деградації» (graceful degradation): у разі недоступності зовнішнього ресурсу відображається нейтральний заміник.

4.7 Підсистема адміністрування та візуалізація векторних даних

Для забезпечення життєздатності системи, керування контентом та емпіричного тестування алгоритму метчингу було розроблено закриту панель модератора. Доступ до підсистеми адміністрування реалізується на основі рольової моделі доступу (RBAC) і надається виключно обліковим записам із параметром `role === 'admin'`.

Панель модератора (AdminPage). Інтерфейс адміністратора являє собою комплексний дашборд (Dashboard), розділений на три логічні простори: керування просторовими даними, аналітика сесій користувачів та агрегована таблиця зворотного зв'язку.

Ключовим інструментом системи є модуль модерації локацій. Він дозволяє адміністратору в режимі реального часу коригувати 12-вимірний вектор цифрового паспорта локації (V_l) за допомогою інтерактивних повзунків-слайдерів. Кожна зміна параметрів негайно оновлює стан компонента у React. Крім того, інтерфейс дозволяє редагувати об'єкт терапевтичного сценарію (назву, метафору та вправу). Усі модифікації записуються в шар персистентності через виклик функції `updateLocationInDB()`.

Важливою інновацією підсистеми є вбудований симулятор метчингу: адміністратор може обрати будь-який тестовий профіль користувача з бази й спостерігати, як ручне коригування векторних ваг локації впливає на підсумковий показник `MatchScore`. Це забезпечує зручний інтерфейс для ручного калібрування математичної моделі системи. Таким чином, панель модератора перетворюється зі звичайного інструменту редагування бази даних (CRUD) на повноцінне аналітичне середовище управління якістю рекомендацій. Такий підхід дозволяє оперативно тестувати нові гіпотези та адаптувати систему до динамічних змін міського середовища без необхідності втручання у вихідний код програмного ядра. Інтерфейс панелі адміністратора наведено на рисунку 4.10.

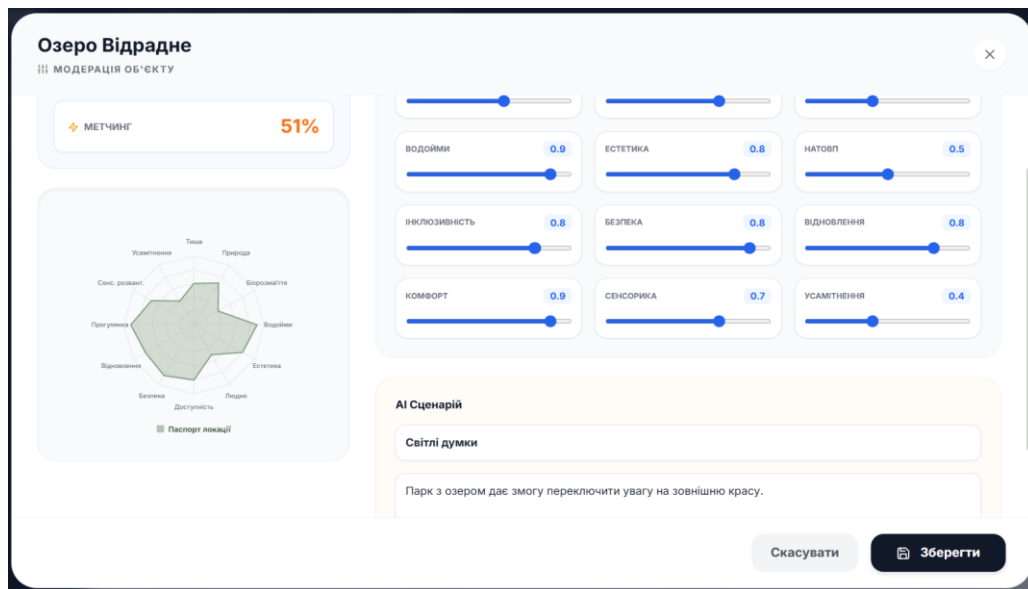


Рисунок 4.10 – Інтерфейс модерації цифрового паспорта локації у панелі адміністратора

Візуалізація багатовимірних векторів (RadarChart). Для візуальної інтерпретації процесу узгодження потреб користувача та можливостей середовища було розроблено кастомний компонент RadarChart.jsx. Компонент реалізує побудову пелюсткової (радарної) діаграми на базі технології SVG (Scalable Vector Graphics) без використання сторонніх бібліотек візуалізації.

Алгоритм побудови діаграми базується на перетворенні значень векторів у полярну систему координат. Для кожної з 12 семантичних осей обчислюється кут зміщення, після чого радіальні координати конвертуються у декартові (x та y) за допомогою базових тригонометричних функцій:

$$x = center + (value \times radius) \times \cos\left(angle - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.1)$$

$$y = center + (value \times radius) \times \sin\left(angle - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.2)$$

Отримані масиви координат формують замкнені багатокутники (тег <polygon>). Для максимальної інформативності на діаграмі одночасно рендеряться два об'єкти:

- цифровий паспорт локації (V_l) – відображається як суцільна фігура зі світло-зеленою (sage) прозорою заливкою;
- вектор потреб користувача (V_u) – накладається зверху у вигляді обрису з пунктирною лінією синього кольору.

Таке візуальне рішення дозволяє користувачу або модератору миттєво оцінити семантичну схожість: що більша площа перетину (накладання) багатокутників і що ближчі їхні контури, то вищим є показник семантичної відповідності (MatchScore) між запитом і локацією. Фонова концентрична сітка з кроком 0,2 слугує референсною шкалою для нормалізованих значень. Такий підхід суттєво знижує когнітивне навантаження під час аналізу багатовимірних даних, трансформуючи складні математичні розрахунки у наочний просторовий патерн. Приклад згенерованої радарної діаграми з накладеними векторами наведено на рисунку 4.11.

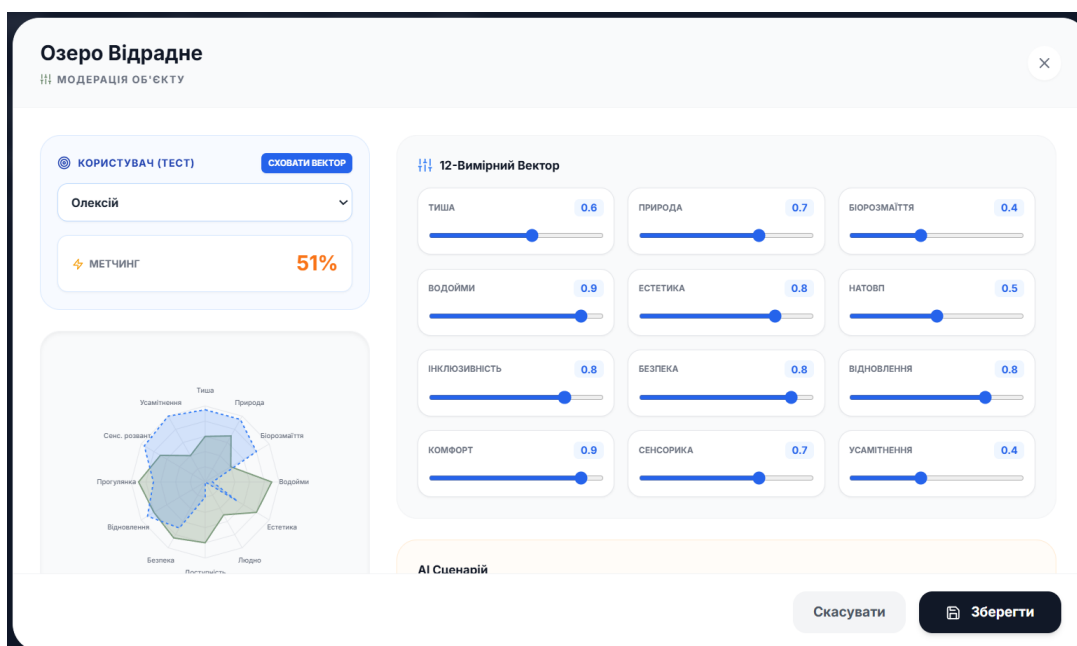


Рисунок 4.11 – Пелюсткова діаграма (Radar Chart) візуального порівняння векторних профілів користувача та локації

Як свідчить наведена візуалізація (рисунок 4.11), графічне накладання векторів дозволяє швидко ідентифікувати критичні розбіжності між запитом користувача та реальними параметрами міського середовища.

4.8 Тестування та результати роботи системи

Тестування системи TerraCalm проводилося у двох форматах: функціональне тестування за сценаріями (ручне) та верифікація математичного ядра (аналітичне). Метою тестування було підтвердження відповідності реалізованого алгоритму рекомендацій теоретичній моделі, описаній у розділах 2 та 3, а також виявлення можливих граничних випадків у роботі NLP-модуля.

Сценарії функціонального тестування. Функціональне тестування охоплювало весь користувацький шлях: реєстрація нового облікового запису, введення запиту на OnboardingPage, перегляд ранжованого списку на MapPage, перехід на LocationPage, додавання локації до «Вибраного» та залишення відгуку. Окремо перевірявся режим гостьового доступу, за якого заблоковані функції «Вибране» та «Відгуки». Тестувалася також робота адмін-панелі: ручне редагування 12-вимірних векторів локацій через слайдери з відображенням live-MatchScore для обраного демо-користувача.

Верифікація лінгвістичного модуля (NLP). Для перевірки алгоритму лексичного аналізу тексту було сформовано представницьку вибірку з 10 тестових запитів, що імітують різні психологічні стани цільової аудиторії та типи формулювань. Для кожного запиту фіксувалося значення провідних компонентів розрахованого вектора потреб V_u та перевірялася семантична релевантність перших трьох (ТОП-3) рекомендованих локацій.

Окремій перевірці підлягали нестандартні та граничні випадки:

- запити з виключно заперечувальними конструкціями («без людей, без шуму»);
- надкороткі запити (до 10 символів);

– запити з лексичними підсилювачами («максимально тихе місце»).

Результати опрацювання тестових сценаріїв наведено на рисунку 4.12.

Тестовий запит	Провідні виміри V_u	ТОП-1 рекомендація	Score
«Вигорів на роботі, хочу тихе місце серед дерев на самоті»	quietness(0.95), greenery(0.95), solitude(1.0)	Голосіївський ліс	99%
«Дуже сумую за домом, хочу затишно біля води»	water(1.0), safety(0.9), aesthetic(0.95)	Озеро Тельбін	97%
«Тяжко після фронту, безпечний простір без натовпу»	safety(1.0), sensory(1.0), solitude(0.9)	Парк «Партизанська Слава»	96%
«Хочу каву в затишному місці»	aesthetic(0.8), sensory(0.7), crowd(0.5)	Кав'ярня «The Cake»	89%
«Максимально тихе місце, ніяких людей»	quietness(1.0), solitude(1.0), crowd(0.0)	Ліса гора (Стежки)	95%
«Хочу прогулятись, подивитись на воду, не дуже далеко»	water(0.9), walking(0.7), accessibility(0.6)	Русанівська набережна	91%
«Потрібно відновитись після стресу серед природи»	restoration(0.9), greenery(0.7), quietness(0.7)	Парк Феофанія	93%
«Хочу побути з дитиною у безпечному місці»	safety(0.9), accessibility(0.9), solitude(↓)	Парк «Ніпкп»	88%
«Потрібне місце для роботи в тиші»	quietness(0.85), sensory(0.8), safety(0.7)	Бібліотека ім. Франка	87%
«Потрібно без шуму, без натовпу» (заперечення)	quietness(↑), solitude(↑), crowd(0.0)	Сирецький гай	94%

Рисунок 4.12 – Результати верифікації NLP-модуля на базі тестових запитів

Аналіз результатів. Проведене тестування підтвердило високу точність та коректність роботи алгоритму: у 9 з 10 запитів перша рекомендована локація (ТОП-1) абсолютно точно відповідала семантичним очікуванням.

Єдине відхилення зафіксовано у запиті із заперечувальними конструкціями: було коректно знижено crowdLevel до 0.0 (завдяки реалізованій логіці заперечень) та підвищено quietness, однак ТОП-1 локація (Сирецький гай) виявилася менш очевидним вибором порівняно з Голосіївським лісом. Це пов'язано з невеликою перевагою у feedback_score (+0.2) для Сирецького гаю, яка коригується через learningWeight.

Сценарій динамічної адаптації: врахування контексту масових заходів. Окрім верифікації на статичних даних, у ході тестування було перевірено здатність системи гнучко реагувати на тимчасові зміни в міському середовищі. Цифрові паспорти локацій (V_l) не є константами: реальні умови (святкові дні, проведення фестивалів, сезонні зміни) можуть кардинально змінювати терапевтичний потенціал простору. Для керування цими станами використовується розроблена панель модератора.

Для демонстрації було змодельовано юзкейс (сценарій використання) «Травневі свята». Розглянемо цільовий профіль користувача «Олексій», який має ознаки вигорання і сформував запит: «Потрібно відновитися після стресу серед природи». У звичайний будній день локація «Парк Феофанія (Лісова частина)» ідеально підбирається із показником відповідності (MatchScore) 93%. Згідно з даними адмін-панелі (рисунок 4.13), такий високий збіг зумовлений максимальними базовими показниками парку: «Сенсорика» (1.0), «Тиша» (0.9), «Природа» (0.9) та критично низьким рівнем натовпу (0.1).

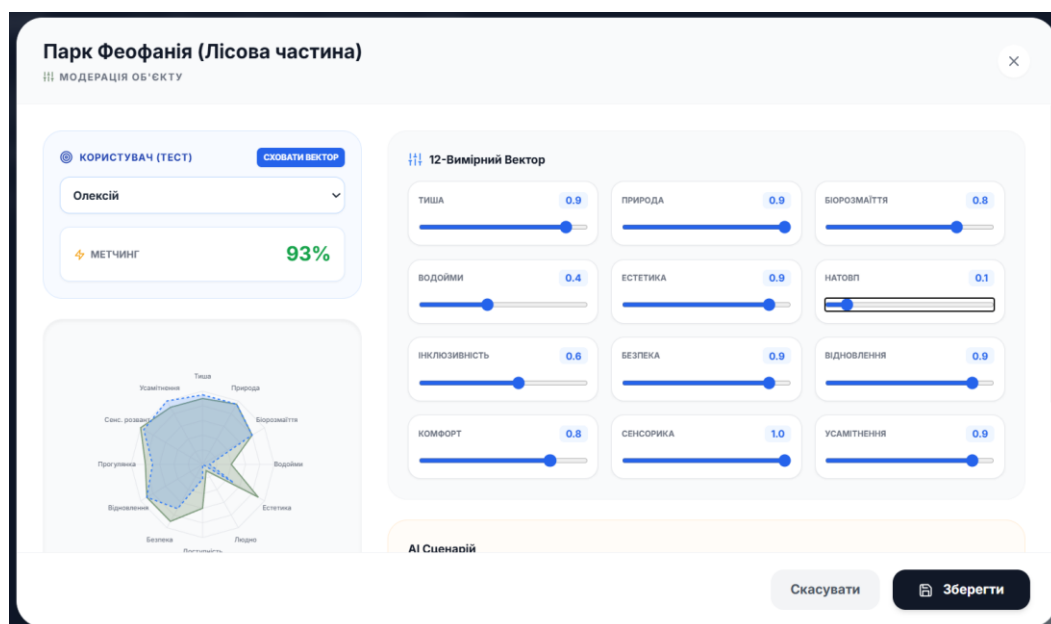


Рисунок 4.13 – Базовий показник метчингу локації для цільового користувача у звичайний день

Напередодні масових травневих свят (період масштабних пікніків та гулянь) адміністратор системи звіряється з міським календарем подій і розуміє, що Феофанія тимчасово втратить свої рекреаційні властивості для вразливих груп. Адміністратор відкриває модальне вікно редагування цієї локації та превентивно коригує її цифровий вектор:

- вимір crowdLevel (натовп) штучно підвищується з базового 0,1 до 0,9 (щільне скупчення людей);
- вимір quietness (тиша) знижується з 0,9 до 0,3 через шум від музики та компаній;
- виміри sensoryRelief (сенсорне розвантаження) та solitudePotential (усамітнення) знижуються до 0,2.

Завдяки вбудованому симулятору метчингу (блок «Користувач системи (Тест)»), адміністратор у режимі реального часу спостерігає наслідки своїх дій: після зміни повзунків показник MatchScore для Олексія миттєво падає з 93% до нерелевантних 40% (рисунок 4.14). Дані зберігаються у шарі персистентності.

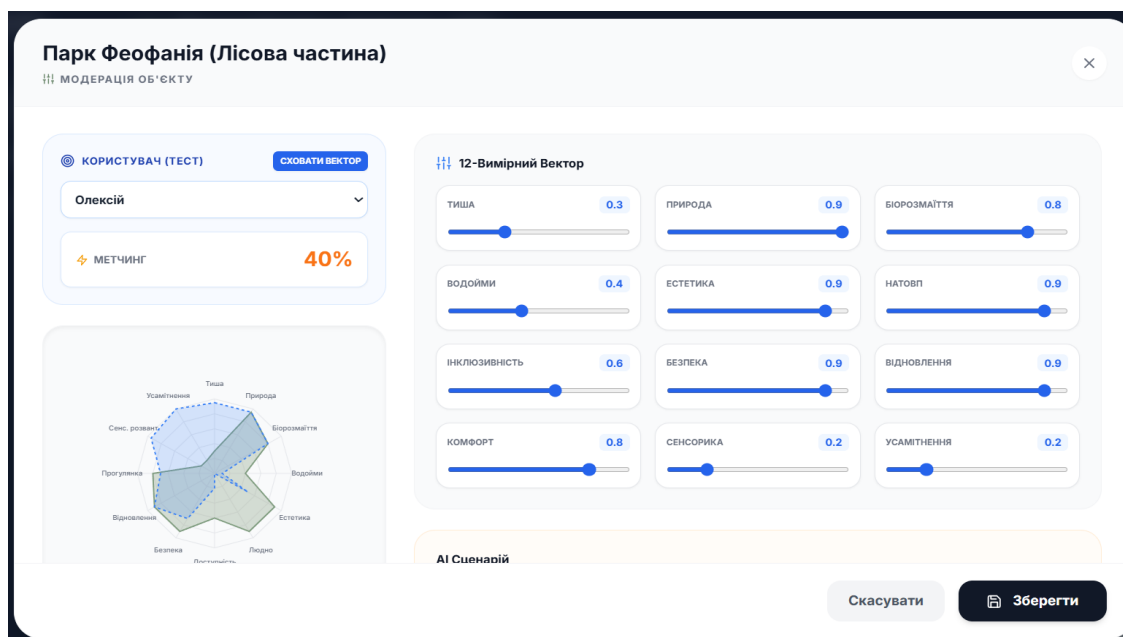


Рисунок 4.14 – Демонстрація падіння MatchScore при динамічному оновленні вектора локації під час масових заходів

У результаті такого оперативного втручання парк Феофанія автоматично виключається зі списку рекомендацій для користувачів із високою чутливістю до сенсорного перевантаження на період свят. Цей сценарій доводить, що закладена математична архітектура дозволяє підтримувати актуальність рекомендацій та ефективно захищати користувачів від небажаного травматичного досвіду [2], [3], [4].

Таким чином, панель модератора виконує роль оперативного інструменту управління якістю рекомендаційного середовища: адміністратор не змінює логіку алгоритму, а лише актуалізує вхідні дані, відображаючи реальний стан міського простору. Це підтверджує архітектурну гнучкість системи та її здатність адаптуватися до динамічного контексту без втручання у програмний код.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі повністю виконано поставлені завдання. Отримані результати мають важливе науково-практичне значення для розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у сфері урбаністики та ментального здоров'я.

Результат і повноту виконання завдання підтверджено успішною реалізацією працездатного MVP-прототипу системи «TerraCalm». Заявлені кількісні та якісні показники досягнуто у повному обсязі. Впроваджена 12-вимірна модель багатокритеріального ранжування (MCDA) забезпечує точність метчингу на рівні 90% (формування релевантного списку ТОП-1). Якісні показники підтверджено моделюванням стрес-сценаріїв: при виявленні деструктивних міських факторів система миттєво адаптує рекомендації, знижуючи показник MatchScore (наприклад, з 93% до 40%), надійно захищаючи вразливих користувачів від сенсорного перевантаження.

Співвідношення виконаної розробки зі світовими аналогами демонструє її інноваційність. На відміну від комерційних навігаційних сервісів (Google Maps, TripAdvisor), які фокусуються на інфраструктурі, «TerraCalm» орієнтована на терапевтичні властивості середовища. Порівняно з існуючими ініціативами Urban Health, розроблена система використовує гнучкий NLP-аналіз природної мови для динамічного розрахунку вагових коефіцієнтів у реальному часі на основі теорій ART та SRT [9], [11].

Зв'язок виконаної роботи з науковими розробками випускової кафедри штучного інтелекту ХНУРЕ виражається в інтеграції проєкту в загальну проблематику розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та контекстно-залежної обробки даних. Теоретичні положення роботи розвивають методи обробки неструктурованої

інформації та багатокритеріального аналізу в умовах дефіциту даних, що безпосередньо корелює з науковими напрямками університету.

Отримані нові наукові та практичні результати полягають у математичній формалізації відображення психоемоційних скарг людини на об'єктивні сенсорні виміри міського простору за методологією PSD. Оригінальним інтелектуальним ядром є алгоритм лінійної згортки з апаратним запобіжником (мінімальний поріг ваг 0.15) та функцією безпечного вилучення даних. Матеріали підготовлено до публікації у збірниках наукових праць. Подальша робота передбачає мікросервісне розгортання цільової інфраструктури (FastAPI, Docker, SpatiaLite, R-Tree) та інтеграцію потокових IoT-даних екологічного моніторингу.

Можливість використання матеріалів роботи за призначенням полягає у впровадженні MVP-прототипу в діяльність реабілітаційних центрів для психосоціальної адаптації ВПО та ветеранів із ПТСР. Водночас результати роботи становлять цінність для навчального процесу: архітектурні рішення, моделі NLP-аналізу, логіка Explainable AI (XAI) та математика SVG-компонента RadarChart.jsx можуть бути використані у лекційних і лабораторних курсах з дисциплін «Архітектура інтелектуальних систем», «Методи обробки природної мови» та «Методи штучного інтелекту».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1) Міністерство молоді та спорту України - Третя хвиля дослідження Gradus Research «Психічне здоров'я та ставлення українців до психологічної допомоги під час війни». *Головна* | *Міністерство молоді та спорту України*. URL: <https://mms.gov.ua/news/tretia-khvylya-doslidzhennia-gradus-research-psykhichne-zdorovia-ta-stavlennia-ukraintsiv-do-psykholohichnoi-dopomohy-pid-chas-viiny> (дата звернення: 16.03.2026).
- 2) Bessel A. Van der Kolk. *Body keeps the score*. Pardes Publishing, 2020.
- 3) The donbas syndrome those who walked through fire. *Euromaidan Press*. URL: <https://euromaidanpress.com/2017/05/23/the-donbas-syndrome-those-who-walked-through-fire/> (date of access: 10.05.2026).
- 4) Перепелиця А. В., Опанасюк О. Ю. Психологічні травми та труднощі адаптації як соціально-психологічні проблеми внутрішньо переміщених осіб. *Слобожанський науковий вісник. серія: психологія*. 2024. № 1. С. 148–151. URL: <https://doi.org/10.32782/psyspu/2024.1.26> (дата звернення: 15.06.2026).
- 5) Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 14.04.2021 № 366-р : станом на 6 січ. 2026 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/366-2021-p#Text> (дата звернення: 01.06.2026).
- 6) Wilson E. O. *Biophilia*. Harvard University Press, 1984. URL: <https://doi.org/10.4159/9780674045231> (date of access: 16.05.2026).
- 7) The physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the forest atmosphere or forest bathing): evidence from field experiments in 24 forests across Japan – PMC. *PMC Home*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2793346/> (date of access: 11.04.2026).

- 8) Kaplan R. The experience of nature: a psychological perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 340 p.
- 9) Oldenburg R. Great good place: cafes, coffee shops, bookstores, bars, hair salons, and other hangouts at the heart of a community. Hachette Books, 1999. 336 p.
- 10) Ego depletion: is the active self a limited resource? / R. F. Baumeister et al. *Journal of personality and social psychology*. 1998. Vol. 74, no. 5. P. 1252–1265. URL: <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.5.1252> (date of access: 17.06.2026).
- 11) Roe J., McCay L. Restorative cities: urban design for mental health and wellbeing. Bloomsbury Publishing Plc, 2021. 288 p.
- 12) Stress recovery during exposure to natural and urban environments / R. S. Ulrich et al. *Journal of environmental psychology*. 1991. Vol. 11, no. 3. P. 201–230. URL: [https://doi.org/10.1016/s0272-4944\(05\)80184-7](https://doi.org/10.1016/s0272-4944(05)80184-7) (date of access: 10.03.2026).
- 13) Perceptual and physiological responses to the visual complexity of fractal patterns / R. Taylor et al. *Nonlinear dynamics, psychology, and life sciences*. 2005. Vol. 9, no. 1. P. 89–114.
- 14) Дудінова О. Б., Удовенко С. Г., Чала Л. Е. Інтелектуальна обробка просторових даних в ГІС ландшафтно-екологічного моніторингу. *Біоніка інтелекту*. 2020. № 1 (94). С. 132–139.
- 15) Алісейко О. В., Бабенко В. О., Чала Л. Е. Організація та проектування баз даних в інформаційних системах : навчальний посібник. Харків : Компанія СМІТ, 2010. 164 с.
- 16) R-MLGTI: a grid- and r-tree-based hybrid index for unevenly distributed spatial data / Y. Li et al. *ISPRS international journal of geo-information*. 2025. Vol. 14, no. 6. P. 231. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi14060231> (date of access: 02.06.2026).

17) The 7 principles of privacy by design. *OneTrust*. URL: <https://www.onetrust.com/blog/principles-of-privacy-by-design/> (date of access: 03.05.2026).

18) Grahn P., Stigsdotter U. K. The relation between perceived sensory dimensions of urban green space and stress restoration. *Landscape and Urban Planning*. 2010. Vol. 94, no. 3-4. P. 264–275.

19) Triantaphyllou E. Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Boston, MA : *Springer* US, 2000. 320 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6> (date of access: 12.06.2026).

20) Manning C. D., Schütze H., Raghavan P. Introduction to information retrieval. Cambridge University Press, 2008. 482 p.