

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПРОЄКТНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ОСЬОВОЇ ЛІНІЇ ОДЕСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

¹**Ковров А.В.**, к.т.н., професор,

rektor@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6037-6080

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

²**Гайко Г.І.**, д.т.н., професор,

h.haiko@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-4263-5958

²**Савченко І.О.**, к.т.н.,

savil.ua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0921-5425

²*Національний технічний університет України*

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна

³**Назаренко І.І.**, д.т.н., професор,

ii_nazar@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1888-3687

³*Київський національний університет будівництва та архітектури*

проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

⁴**Голландер Дж.**, д-р арх., професор,

justin.hollander@tufts.edu, ORCID: 0000-0001-5148-7902

⁴*Університет Тафтса*

Бостонська алея, 506, м. Медфорд, шт. Массачусетс, 02155, США

Анотація. Регулювання розвитку урбаністичного простору з метою підвищення комфорту, екологічних стандартів і безпеки життя в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найбільш актуальних, але недостатньо вивчених і складних глобальних проблем. Концепція сталого розвитку міського середовища приділяє значну увагу здатності підземного простору взяти на себе функції найбільш критичних і вразливих наземних об'єктів і комунікацій, забезпечуючи мінімізацію транспортних, безпекових і екологічних проблем, що значною мірою (для умов міста Одеси) може бути досягнуте будівництвом осьової (північ – південь) лінії Одеського метрополітену. Повоєнне відновлення Одеси сприятиме новим можливостям для реалізації великих інфраструктурних проєктів на засадах міжнародного партнерства, зокрема – будівництва метрополітену.

Метою досліджень є системна порівняльна оцінка альтернативних проєктних конфігурацій осьової лінії Одеського метрополітену (її південної частини).

Основним методом дослідження обрано метод модифікованого морфологічного аналізу, який є ефективним інструментом системної методології для умов багатокритеріальних впливів і високої невизначеності. Розроблена системна методологія та інструментарій прийняття планувальних рішень у сфері підземної урбаністики, а також досвід застосування планувальних методик, що використовують наукове передбачення майбутнього розвитку міст були використані для побудови морфологічної моделі ділянок Одеського метрополітену.

Розроблена морфологічна модель дозволила оцінити вплив 10 структурно-функціональних факторів і обробити понад 349 000 конфігурацій значень для отримання кількісних оцінок і порівняння альтернативного розташування кінцевих станцій Одеського метрополітену. Розглядалися впливи: на вирішення транспортної проблеми, сприяння містобудівельному розвитку, сприяння туристично-рекреаційному розвитку, мінімізацію екологічних проблем, цивільний захист населення. Це дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективний інструмент для прийняття планувальних рішень, виходячи із системних позицій.

Ключові слова: підземне будівництво, транспортна інфраструктура, метрополітен, системний аналіз, морфологічна модель.

Вступ. «Одеса з повним правом може претендувати на одне з чільних місць серед великих міст світу» – так починає свою «Історію Одеси» дослідниця Гарвардського університету Патриція Герлігі [1] (з чим повністю погоджуються автори даної статті). Здається, що вже «батьки-засновники» міста (засноване в 1794 р.), каталонець за походженням адмірал Хосе де Рібас, нідерландський інженер Франц де Воллан, французькі аристократи Арман Емманюель дю Плессі (п'ятий герцог де Рішельє) та граф Луї Олександр Андро де Ланжерон (учасник Війни за незалежність США), які перебували на службі Російській імперії, заклали тренд європейських устремлінь Одеси («південне вікно в Європу») та непритаманну колишній імперії ідею «відкритого міста», сприятливого для формування мультикультурного розвитку [2].

План забудови Одеси розробив інженер-полковник Франц де Воллан, який сформувався як інженер-будівельник у голландських поселеннях Північної Америки, увібравши кращий досвід тогочасного містобудування (закладена ним планувальна структура центрального ядра міста збереглася до наших днів). Письменник Марк Твен, який відвідав Одесу в 1867 р., зазначав: «Я... відчував себе зовсім як удома. На вигляд Одеса точнісінько американське місто: красиві широкі вулиці, до того ж прямі; невисокі будинки (в два-три поверхи) – просторі, охайні, без жодних химерних прикрас; вздовж тротуарів наша біла акація; ділова метушня на вулицях та в лавках; квапливі пішоходи; будинки й усе довкола новеньке як з голочки, що так звично нашому оку; і навіть густа хмара пилу огорнула нас ніби привіт з милої нашому серцю батьківщини... Куди не подивися, праворуч, ліворуч, скрізь перед нами Америка!» («Простаки за кордоном, або шлях нових паломників») [3]. Шедеври визнаних європейських архітекторів XIX – початку XX ст. у стилях класицизму, ампіру та модерну і сьогодні щедро прикрашають вулиці історичного середмістя Одеси (об'єкт Світової спадщини ЮНЕСКО) [4].

На початку XX ст. Одеса була найбільшим містом України з населенням понад 400 тис. мешканців і вийшла на четверте місце в Російській імперії за розмірами та економічним потенціалом. Цей ринок і порт забезпечував (з різною інтенсивністю) українським зерном країни Європи та Західної Азії протягом всього XIX ст. [5]. Актуальна проблема «зернового коридору» для продовольчої безпеки Глобального Півдня, як бачимо, має поважну історію.

Сьогодні Одеса є містом воєнного часу, зруйновано або ушкоджено десятки пам'яток архітектури середмістя (яке входить до списку Світової спадщини ЮНЕСКО). Здається тепер не кращий час для прогнозування майбутнього розвитку міста (особливо великих інфраструктурних проєктів), але, на думку авторів статті, саме зараз слід планувати нове майбутнє української Одеси, зокрема пам'ятаючи написане Марком Твеном: «Одеса, можливо, ще зрівняється з найвеличнішими містами Старого Світу».

На 2022 р. населення Одеси перебільшувало 1 млн. мешканців, площа складала понад 162 км², а протяжність з півночі на південь – близько 35 км. У місті знаходиться найбільший морський порт України, розвинуті нафтопереробна, металообробна, машинобудівна, хімічна, легка й харчова промисловість. Довоєнна Одеса інтенсивно розвивалася як багатофункціональний економічний, курортно-рекреаційний і туристичний центр.

Серед найбільших проблем сталого розвитку Одеси протягом останніх десятиріч слід зазначити функціонування міського транспорту, яка отримала особливу гостроту в 2015-2018 роках (до епідемії COVID-19), коли щорічна кількість туристів та відпочиваючих на пляжах Одеси складала понад 3 млн. осіб [6, 7]. Одеса – портове місто. Його специфікою є те, що в центрі міста знаходиться вантажний порт та залізничний вокзал, що формує значне зосередження транспорту. Забудова міста в основному відповідає прямокутній схемі транспорту, також від центральної частини в радіальних напрямках проходять магістралі загальноміського значення, які виходять на мережу зовнішніх доріг. Недоліком прямокутної схеми є велика кількість завантажених перехресть, що ускладнюють організацію руху і збільшують транспортні витрати, формують великі переїзди автомобілів. Слід зазначити,

що планування й розвиток основної частини міста відбувались у період використання ще гужового транспорту, тому існуюча магістрально-вулична мережа не може без проблем забезпечувати сучасну інтенсивність руху автомобільного транспорту (корки й транспортні простоти є типовим явищем). Передбачене в Генеральному плані м. Одеси [8] будівництво та реконструкція автомобільної транспортної мережі здатне дещо покращити існуючу проблемну ситуацію, проте збільшення пропускної спроможності міських вулиць у більшості випадків вже вичерпані, а повоєнні темпи зростання рівня автомобілізації та автотуризму будуть нівелювати обмежені позитивні ефекти намічених заходів.

Виходячи з цього, слід (на думку авторів) на новому науково-методологічному рівні повернутися до аналізу планів будівництва Одеського метрополітену, який здатен найбільш ефективним чином вирішити комплекс проблем розвитку Одеси: територіальну, транспортну, рекреаційну, екологічну, а з урахуванням воєнних і терористичних загроз – значною мірою і безпекову. Імовірна міжнародна підтримка великих інфраструктурних проєктів на етапі повоєнного відновлення Одеси відкриває виняткові можливості для втілення давньої мрії одеситів – будівництва Одеського метрополітену.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із важливих напрямків покращення транспортної ситуації в Одесі є розвиток ефективного громадського транспорту як альтернативи індивідуальним автомобільним перевезенням. Про значні ефекти й можливості цього напрямку свідчать численні міжнародні дослідження, приміром [9]. Вони свідчать, що площа поверхні, необхідна для функціонування індивідуального (автомобільного) транспорту потребує в 30-90 разів більше простору, ніж громадський транспорт (при тих самих обсягах перевезень пасажирів), при цьому громадський транспорт призводить до скорочення часу подорожі, нижчого споживання енергії та зменшення шумового забруднення [9]. Транспортні моделі міст свідчать на користь розвитку системи громадського транспорту [10, 11]. Так дослідження [11] вказує на систему метро Нью-Йорка як на взірцевий транспортний архетип. Його 232 милі колій спроектовані з резервуванням на перспективу (три-чотири колії на кожную лінію метро) та з високою транспортною щільністю: майже 150 поїздів проходять через Нижній Мангеттен щогодини. Метрополітен бачиться як найбільш ефективний спосіб вирішення міських транспортних проблем, який одночасно позитивно впливає на кліматичну нейтральність, зменшує екологічні та безпекові ризики.

Вперше ідея будівництва Одеського метрополітену сформувалася в 1960-х роках, у 1979-х, коли чисельність населення Одеси досягла 1 млн. осіб, було розроблено концепт будівництва метрополітену як однієї протяжної «осьової» лінії з півночі на південь. У середині 1980-х проєктний інститут «Ленметрогипротранс» (тепер м. Санкт-Петербург) розпочав проєктні роботи. Тунелі планували прокласти нижче покладів вапняків, які були пронизані системами катакомб, що утворилися від довготривалого видобування будівельного каменю. Проте генеральний секретар ЦК КПРС Костянтин Черненко викреслив українські міста Одесу та Донецьк з плану будівництва метрополітенів, замінивши їх російськими містами. Наприкінці 1990-х одеські інженери почали розробляти нові плани та конструктивні рішення Одеського метрополітену, які, нажаль, не були підтримані відповідними державними програмами України.

У проєкт Генерального плану м. Одеси закладені дві лінії метрополітену загальною протяжністю 37 км (рис. 1) [8]. Як альтернативний варіант розглядається легкий метрополітен. На розрахунковий етап до 2031 р. була запланована для будівництва ділянка першої лінії («північ-південь») від житлового масиву на півночі Пересипського району (колишня назва імені Котовського) до залізничного вокзалу. Її протяжність близько 18 км. Ця ділянка чітко визначена і затверджена в Генеральному плані міста. Усі інші траси (лінії) метрополітену є перспективними й можуть уточнюватися. Передбачалося, що перша лінія пройде до південно-західного житлового масиву в напрямку Люстдорфської дороги (рис. 1, кінцева станція 1), а загальна протяжність лінії складе 26,2 км. Друга лінія протяжністю 10,2 км може пройти від Фонтанської дороги (рис. 1, кінцева станція 2) до залізничного вокзалу (місця переходу з однієї на іншу лінію) і далі до західної промислової зони міста.



Рис. 1. Альтернативні шляхи і кінцеві станції Одеського метрополітену:
ділянка 1 – кінцева станція «Проспект академіка Глушка» першої лінії;
ділянка 2 – кінцева станція «Фонтанна» другої лінії

Основна проблема проекту Одеського метрополітену – відсутність інвестицій, рішення якої може спиратися на партнерство приватного і державного секторів [12]. Історія Одеси має успішні приклади подібних інфраструктурних проектів – будівництво міської кінної залізниці (1880 р.) та електричного трамваю (1910 р.), які здійснили бельгійські акційні товариства. На повоєнному етапі найреалістичнішим є проєкт метро з однією лінією «північ-південь». При цьому «північна» ділянка першої лінії (від півночі Пересипського району до залізничного вокзалу) визначена в Генеральному плані однозначно.

Південна частина поки є перспективною й може пролягати або в напрямку Люстдорфської дороги, або другої лінії в напрямку проспекту Шевченка і Фонтанської дороги.

Метою даних досліджень є системна порівняльна оцінка переваг та ризиків зазначених альтернативних маршрутів осової лінії (їх південних кінцевих станцій) для забезпечення інвесторів, міської адміністрації, громадських організацій системним інструментарієм прийняття рішень щодо найбільш перспективного розвитку Одеського метрополітену і міста в цілому.

Матеріали та методика дослідження. Метрополітен завжди формує основу, «кістяк» пасажирських перевезень міста, забезпечує новий розвиток землекористування, будівельного освоєння територій, вартості нерухомості, значною мірою впливає на екологічність та кліматичну нейтральність міст, може слугувати надійним укриттям цивільного населення при воєнних загрозах [12]. Важливо також враховувати впливи на соціальну інтеграцію людини у великому місті, соціокультурні та екзистенціальні виклики для Номо urbanus [13]. Робота [14] пов'язує розвиток транспорту з різнобічними аспектами життя міських громад і, зокрема, зазначає: «відсутність комплексного планування транспортних систем, без належного врахування соціальних, економічних і культурних елементів міста, може призвести до фізичних розривів у тканині громад і посилити соціальну ізоляцію». Перспективними бачаться планувальні ідеї, які спираються не тільки на існуючий стан речей, а й враховують наукові передбачення розвитку міста, а часом цілеспрямовано сприяють реалізації цих передбачень [14, 15]. Усе це потребує при аналізі варіантів можливих маршрутів (трас) метрополітену використовувати системний підхід, спрямований на вирішення не тільки існуючої транспортної проблеми, яка стає первісною причиною створення лінії швидкісного підземного транспорту, але й інших аспектів розвитку міста з урахуванням їх складних взаємозалежностей.

В Навчально-науковому Інституті прикладного системного аналізу КНУ ім. Ігоря Сікорського була розроблена формалізація ряду методів якісного аналізу, зокрема морфологічного аналізу, що є частиною основи комплексу інструментів побудови сценарних альтернатив на основі інтерактивної людино-комп'ютерної процедури (інформаційної платформи сценарного аналізу) [16, 17]. Дана методика та інструментарій були адаптовані для планування міських підземних об'єктів, апробовані при виборі ділянок для підземних автостоянок, автомобільних тунелів, підводних об'єктів [13, 18, 19].

Для поставленої мети застосовувався модифікований метод морфологічного аналізу як багатоцільовий потужний інструмент системного дослідження та підтримки прийняття рішень стосовно об'єктів, яким притаманна невизначеність [20]. Модифікація методу [17, 21] полягає в кількісному оцінюванні альтернатив параметрів і зв'язків між ними, що дає змогу обґрунтовано працювати з великою кількістю конфігурацій об'єкта, які неможливо обробити вручну.

У роботі [22] досліджувався пріоритетний рейтинг альтернативних ліній Одеського метрополітену з використанням одноетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу. У представленому новому дослідженні використовувалась повноцінна двоетапна процедура методу [17], в якій на першому етапі усебічно досліджувалась ситуація в районі потенційних кінцевих станцій метрополітену, а на другому етапі оцінювався очікуваний вплив на різні критичні фактори функціонування міста.

Для імплементації даної процедури застосовувались програмні засоби на основі SAS Studio з авторськими модулями Microsoft Visual Studio, що відповідають основним етапам МММА. У випадку застосованої двоетапної процедури взаємодія між модулями показана на рис. 2.

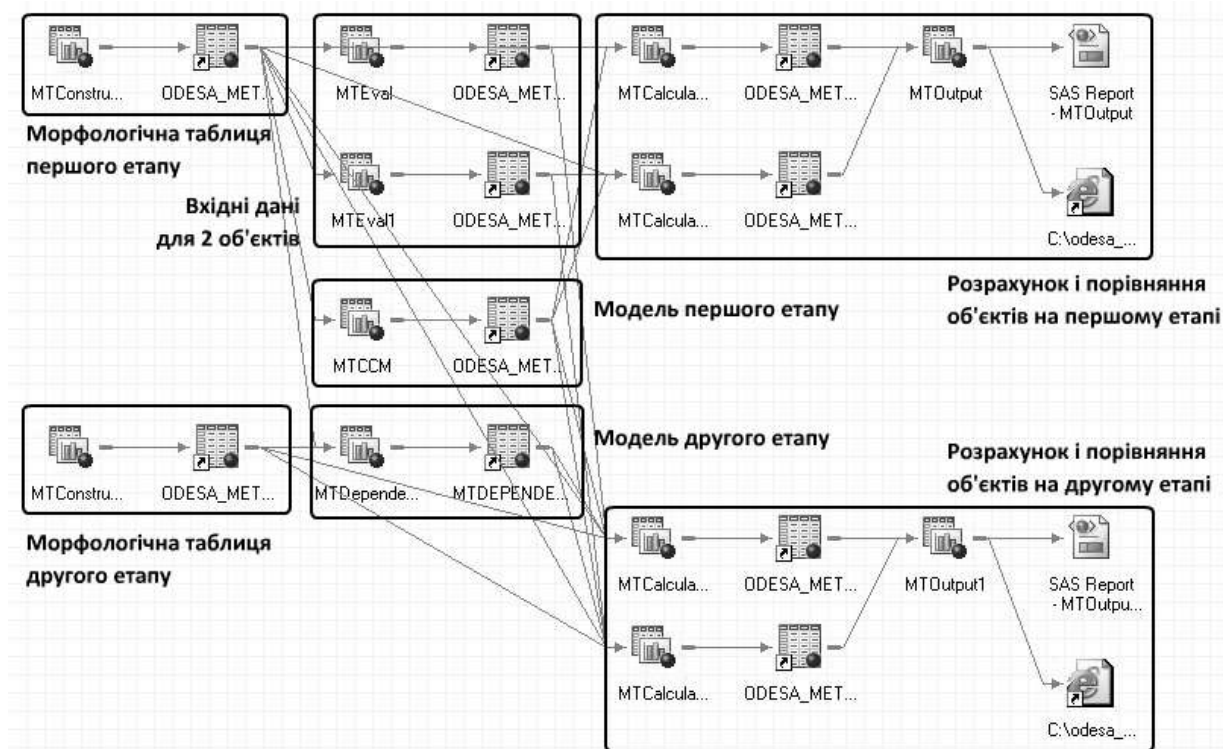


Рис. 2. Взаємодія модулів програмного забезпечення для розв'язання задачі

Об'єктом першого етапу дослідження було обрано зону в радіусі 1 км від потенційної кінцевої станції метрополітену – орієнтовну територію її впливу. Через різноманітність і невизначеність характеристик цієї ділянки доцільно використати метод МММА. Було визначено 10 ключових параметрів, що найсуттєвіше впливають на оцінку впливу станції метрополітену. Всі вони, разом з описом альтернатив, представлені в морфологічній таблиці (табл. 1).

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних факторів території впливу кінцевої станції метрополітену

Параметр	Альтернативи параметра
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр» (офісні та адміністративні споруди, ділові й культурні центри)
	1.2. «Старе місто» (історичні та архітектурні пам'ятки)
	1.3. «Спальний район» (типова житлова забудова)
	1.4. «Рекреаційна зона» (курортні об'єкти, парки, пляжі)
	1.5. «Торгівельна зона» (мегамаркети, оптові бази, великі ринки)
	1.6. «Промислова зона» (виробничі об'єкти, транспортні споруди, склади)
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га
	2.2. 150-250 осіб/га
	2.3. 250-450 осіб/га
	2.4. 450-540 осіб/га
	2.5. Позанормативна (більше 540 осіб/га)
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²
	3.2. 1-1,5 км/км ²
	3.3. 1,5-2 км/км ²
	3.4. 2-2,5 км/км ²
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька (до 1 тис. осіб на добу)
	4.2. Середня (1-10 тис. осіб на добу)
	4.3. Висока (10-20 тис. на добу)
	4.4. Вельми висока (понад 20 тис. на добу)
5. Маятниковий рух працівників (на роботу – з роботи)	5.1. Низький
	5.2. Середній
	5.3. Високий
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»
	6.3. Задовільна
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні
	7.2. Суттєво обмежені
	7.3. Достатні
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год
	8.2. 20-30 км/год
	8.3. 30-50 км/год
9. Містобудівельний потенціал території	9.1. Низький
	9.2. Середній
	9.3. Високий
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту (підземних об'єктів)	10.1. Значна невідповідність потребам
	10.2. Часткова невідповідність потребам
	10.3. Відповідність потребам

Тип урбаністичного середовища (параметр 1) буде визначати переважну функцію території навколо кінцевої станції. Будь який з них вочевидь покращить своє функціонування з появою станції метрополітену, проте різною мірою і з різним впливом на розвиток навколишньої території.

Щоденна кількість пасажирів, які користуватимуться станцією метро, значною мірою залежить від щільності населення в цій зоні (параметр 2), адже вона визначає інтенсивність переміщень мешканців у повсякденних справах.

Стан транспортної інфраструктури відображає щільність магістральної мережі (параметр 3). Чим вона менша, тим менше альтернативних маршрутів, більше заторів і нижча швидкість руху, що підсилює потребу в будівництві метро. Середня щільність магістральної мережі на забудованій частині міста на сьогодні складає 1,29 км/км².

Мобільність туристів і відпочиваючих (параметр 4) має як прямий, так і непрямий вплив. Прямий – це додаткові пасажирів, що користуватимуться метро для поїздок у рекреаційні зони. Непрямий – зростання навантаження на транспорт через розвиток туризму й рекреаційного будівництва. Не прямий вплив не завжди чітко простежується в планувальних рішеннях. До повномасштабного російського вторгнення Одеса приймала до 3 млн туристів на рік, що викликало локальні транспортні колапси. Без вирішення цих проблем повоєнне зростання туризму буде обмеженим. Це формує систему взаємозалежностей: мобільність туристів – розвиток рекреацій – метро як ключ до транспортного розвантаження.

«Маятниковий рух» працівників (параметр 5) суттєво впливає на транспортну систему, особливо в години пік, спричиняючи затори та затримки. Він тісно пов'язаний із щільністю населення й зайнятістю: до повномасштабного російського вторгнення 34,6% працювали у виробничій сфері, 65,4% — у невиробничій. Основний потік рухається з півдня на північ і навпаки, що робить осьову лінію метро стратегічно важливою. Всі інші напрямки охоплюють лише до 20% пасажиропотоку.

Доступність наявного громадського транспорту (параметр 6) і його альтернативні типи (параметр 7) визначають зручність транспортної логістики для мешканців та свідчать про рівень проблем із пасажирськими перевезеннями у певному районі. Параметр 8, а саме середня швидкість руху автотранспорту, є близьким за змістом до параметрів 6 і 7, але має ще й екологічне значення: чим нижча швидкість і більше заторів, тим вищий рівень шкідливих викидів та екологічних ризиків. Цей параметр також демонструє переваги швидкості руху метрополітемом як екологічно чистим видом транспорту.

Параметр 9 (містобудівельний потенціал території) відіграє ключову роль у визначенні можливостей розвитку району після відкриття станції метро. Він пов'язаний як з наявністю вільних ділянок, природних умов (наприклад, рельєфу), так і з можливістю оновлення застарілої забудови. Водночас важливими є інвестиційна привабливість території, їх пріоритетність для будівельного освоєння з врахуванням очікуваного зростання ринкової вартості нерухомості. Цей параметр тісно пов'язаний із загальною стратегією розвитку району та Одеси в цілому, адже уявлення про майбутнє міста безпосередньо впливає на оцінку цього параметру.

Параметр 9 (фактор захисних споруд цивільного захисту) набув актуальності лише останнім часом, проте буде її зберігати. Донедавна повномасштабна війна в Європі здавалася малоімовірною, але тепер її реальність в Україні змінила підходи до безпеки для всіх сусідів Росії [23]. Підземні укриття, зокрема станції метро, стали важливою складовою захисту населення. Наприклад, у Києві 46 підземних станцій цілодобово функціонують як укриття, де під час тривоги переходять від ракетних та дронівих атак до 60 тисяч мешканців.

На другому етапі досліджень було визначено п'ять основних типів впливу на функціонування міста від побудови метрополітену: вирішення транспортних проблем; сприяння містобудівельному розвитку; сприяння туристично-рекреаційному розвитку; мінімізація екологічних проблем; цивільний захист населення.

Морфологічна таблиця другого етапу досліджень наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Морфологічна таблиця факторів впливу кінцевої станції метрополітену на функціонування міста

Параметр	Альтернативи параметра
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив
	А.2. Помірний вплив
	А.3. Суттєвий вплив
	А.4. Переважаючий вплив
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив
	В.2. Помірний вплив
	В.3. Суттєвий вплив
	В.4. Переважаючий вплив
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив
	С.2. Помірний вплив
	С.3. Суттєвий вплив
	С.4. Переважаючий вплив
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив
	D.2. Помірний вплив
	D.3. Суттєвий вплив
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив
	Е.2. Суттєвий вплив
	Е.3. Переважаючий вплив

Для забезпечення більш об'єктивної оцінки категорії впливу різних факторів були описані у вербальній формі.

А. Вирішення транспортної проблеми (мобільності) для населення та туристів (відпочиваючих) на відповідній ділянці з радіусом 1 км від станції:

А.1. Незначний вплив – станція не суттєво змінює конфігурацію транспортних потоків території; наявні транспортні проблеми вирішуються недостатньо.

А.2. Помірний вплив – станція частково розвантажує пасажиропотоки на відповідній ділянці, проте не перетворюється на суттєвий фактор в транспортній мережі; наявні транспортні проблеми дещо зменшуються.

А.3. Суттєвий вплив – станція суттєво розвантажує пасажиропотоки на ділянці і стає важливим вузлом транспортної мережі; наявні транспортні проблеми істотно зменшуються.

А.4. Переважаючий вплив – станція переорієнтовує на себе основні пасажиропотоки на ділянці, значно розвантажуючи транспортну мережу; транспортні проблеми мешканців та туристів успішно вирішуються.

В. Сприяння містобудівельному розвитку відповідної території:

В.1. Незначний вплив – станція майже не створює нових можливостей для розвитку території. Це може бути зумовлено як щільною існуючою забудовою, так і низькою інвестиційною привабливістю ділянки.

В.2. Помірний вплив – станція частково підвищує привабливість території, сприяє зростанню вартості нерухомості, проте не призводить до суттєвих якісних змін з точки зору розвитку даної території.

В.3. Суттєвий вплив – станція відкриває нові перспективи розвитку даної території міста, значно збільшуючи вартість нерухомості та привабливість ділянки для інвестування.

В.4. Переважаючий вплив – станція виступає вирішальним чинником розвитку території, стимулюючи масштабне будівництво інфраструктури, а також висококласних об'єктів рекреаційного, готельного, ділового й житлового призначення.

С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку даної території:

С.1. Незначний вплив – станція та прилегла територія не мають вираженої туристичної привабливості й переважно обслуговуватимуть потреби місцевих мешканців.

С.2. Помірний вплив – станція частково використовуватиметься при переміщеннях туристів, але не відіграє значної ролі у туристично-рекреаційному розвитку території.

С.3. Суттєвий вплив – станція відіграватиме важливу роль у забезпеченні мобільності туристів і відпочивальників, значно підвищуючи туристично-рекреаційну привабливість території.

С.4. Переважаючий вплив – станція створює нові суттєві можливості для розвитку туристично-рекреаційного потенціалу території.

D. Захист природного середовища (мінімізація екологічних проблем):

D.1. Незначний вплив – станція а також пов'язані з її будівництвом зміни в транспортній мережі суттєвого впливу на навколишнє екологічне середовище не матимуть.

D.2. Помірний вплив – станція та відповідне зниження навантаження на транспортну мережу частково сприятимуть покращенню екологічної ситуації на відповідній території.

D.3. Суттєвий вплив – станція та спричинене нею розвантаження транспортної мережі суттєво покращать екологічний стан території.

E. Цивільний захист населення (на випадок воєнних чи терористичних атак):

E.1. Помірний вплив – станція має деякий потенціал для використання як укриття цивільного захисту для жителів прилеглих вулиць;

E.2. Суттєвий вплив – станція має високий потенціал для використання як укриття цивільного захисту для мешканців і туристів, які перебувають на відповідній території.

E.3. Переважаючий вплив – станція стане основною спорудою цивільного захисту на відповідній території.

Наступним етапом у побудові моделі за МММА стало визначення взаємозв'язків між параметрами першої морфологічної таблиці, а також зв'язків між параметрами першої та другої таблиць. Ця процедура здійснювалася шляхом експертного опитування. У табл. 3 наведені наявні зв'язки між параметрами 1–10, А–Е з табл. 1–2.

Таблиця 3 – Наявність або відсутність зв'язків між параметрами морфологічних таблиць (позначка «+» означає, що зв'язок між параметрами присутній, порожня клітинка – відсутній)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	A	B	C	D	E
1			+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
2			+		+	+	+	+		+	+	+			+
3	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+		+	
4	+		+			+	+	+	+	+	+	+	+		+
5	+	+	+			+	+	+			+			+	
6	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		
7		+	+	+	+	+		+	+		+		+		
8	+	+	+	+	+	+	+		+		+			+	
9	+		+	+		+	+	+		+	+	+	+		
10	+	+		+					+				+		+

Результати досліджень. У результаті двоетапної процедури МММА було проаналізовано 349 920 конфігурацій, згенерованих на першому етапі за морфологічною таблицею. Результати цього етапу наведені в таблиці 4. У таблиці відображені початкові значення, отримані експертним шляхом, і обчислені за допомогою процедури МММА значення, що враховують взаємозв'язки між параметрами (табл. 3). Тут і далі за текстом під «Ділянкою 1» розуміється кінцева станція в районі Люстдорфської дороги; під «Ділянкою 2» розуміється кінцева станція метро в районі Фонтанської дороги.

Таблиця 4 – Вхідні і уточнені з урахуванням взаємозв'язків оцінки параметрів морфологічної таблиці структурно-функціональних факторів

Параметр	Альтернативи параметра	Нормовані вхідні дані		Уточнені за МММА дані	
		Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 1	Ділянка 2
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр»	0,087	0,114	0,129	0,100
	1.2. «Старе місто»	0	0	0,000	0,000
	1.3. «Спальний район»	0,348	0,200	0,518	0,222
	1.4. «Рекреаційна зона»	0	0,457	0,000	0,388
	1.5. «Торгівельна зона»	0,283	0,114	0,315	0,276
	1.6. «Промислова зона»	0,283	0,114	0,038	0,014
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га	0,091	0,432	0,020	0,339
	2.2. 150-250 осіб/га	0,295	0,351	0,118	0,367
	2.3. 250-450 осіб/га	0,364	0,108	0,577	0,206
	2.4. 450-540 осіб/га	0,159	0,108	0,219	0,087
	2.5. Більше 540 осіб/га	0,091	0	0,066	0,000
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²	0,175	0,259	0,018	0,083
	3.2. 1-1,5 км/км ²	0,400	0,593	0,334	0,797
	3.3. 1,5-2 км/км ²	0,325	0,148	0,596	0,120
	3.4. 2-2,5 км/км ²	0,100	0	0,053	0,000
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька	0,593	0	0,108	0,000
	4.2. Середня	0,259	0,194	0,764	0,693
	4.3. Висока	0,148	0,361	0,128	0,224
	4.4. Вельми висока	0	0,444	0,000	0,083
5. Маятниковий рух працівників	5.1. Низький	0,111	0,552	0,004	0,207
	5.2. Середній	0,444	0,448	0,647	0,793
	5.3. Високий	0,444	0	0,349	0,000
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька	0,148	0,481	0,020	0,098
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»	0,593	0,259	0,950	0,855
	6.3. Задовільна	0,259	0,259	0,030	0,047
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні	0	0,148	0,000	0,026
	7.2. Суттєво обмежені	0,350	0,593	0,284	0,761
	7.3. Достатні	0,650	0,259	0,716	0,213
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год	0,194	0,361	0,061	0,216
	8.2. 20-30 км/год	0,444	0,444	0,835	0,742
	8.3. 30-50 км/год	0,361	0,194	0,104	0,042
9. Місто-будівельний потенціал території	9.1. Низький	0,696	0,233	0,127	0,090
	9.2. Середній	0,304	0,533	0,873	0,874
	9.3. Високий	0	0,233	0,000	0,036
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту	10.1. Значна невідповідність потребам	0,361	0,552	0,182	0,202
	10.2. Часткова невідповідність потребам	0,444	0,448	0,794	0,798
	10.3. Відповідність потребам	0,194	0	0,024	0,000

На другому етапі МММА були обчислені оцінки впливу структурно-функціональних факторів на різні аспекти функціонування Одеси. Результати даних розрахунків наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Оцінки впливу побудови кінцевої станції метрополітену за одним із двох варіантів

Параметр	Альтернативи параметра	Ділянка 1	Ділянка 2
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив	0,050	0,076
	А.2. Помірний вплив	0,451	0,481
	А.3. Суттєвий вплив	0,449	0,409
	А.4. Переважаючий вплив	0,050	0,035
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив	0,069	0,042
	В.2. Помірний вплив	0,527	0,371
	В.3. Суттєвий вплив	0,368	0,483
	В.4. Переважаючий вплив	0,035	0,105
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив	0,243	0,151
	С.2. Помірний вплив	0,484	0,426
	С.3. Суттєвий вплив	0,211	0,305
	С.4. Переважаючий вплив	0,062	0,118
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив	0,108	0,044
	D.2. Помірний вплив	0,447	0,431
	D.3. Суттєвий вплив	0,445	0,526
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив	0,440	0,427
	Е.2. Суттєвий вплив	0,449	0,433
	Е.3. Переважаючий вплив	0,111	0,140

Кожний з факторів впливу розглядатиме окремо.

За параметром «А. Вирішення транспортної проблеми» ділянка 1 переважає в діапазонах «суттєвий» і «переважаючий» вплив (рис. 3). Це пов'язано з вищою щільністю населення в зоні майбутньої кінцевої станції. Тут переважає багатоповерхова забудова, включно з висотками, тоді як на ділянці 2 розташована переважно садибна забудова. Також для ділянки 1 більш значним є «маятниковий рух» працюючих мешканців. Решта параметрів або мають близькі значення, або незначно переважають на користь ділянки 2. Для дослідження ділянки 2 розглядалася територія радіусом 1 км від потенційного місця розташування кінцевої станції, відповідно сюди не потрапили трохи віддалені і щільно населенні житлові висотні комплекси курортного району Аркадія. Проте при реалізації проєкту лінії 2 мешканці Аркадії будуть активно користуватися метрополітеном, що за параметром «Вирішення транспортної проблеми» зближить потенціал обох варіантів.

За параметрами «В. Сприяння містобудівельному розвитку» та «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку» перевагу в діапазонах «суттєвий вплив» і «переважаючий вплив» має ділянка 2 (рис. 4, 5). Хоча Генеральний план Одеси до 2031 року не передбачає значного приросту забудови в цих районах через високу щільність населення, обмеженість вільних територій, природні обмеження (зокрема берегові схили) та транспортні проблеми, напрямок Фонтанської дороги залишається привабливим для інвесторів. Близькість до моря робить цей район перспективним для розвитку туризму, рекреації та об'єктів сфери обслуговування, які вже сьогодні є пріоритетними напрямками інвестиційної діяльності в Одесі.

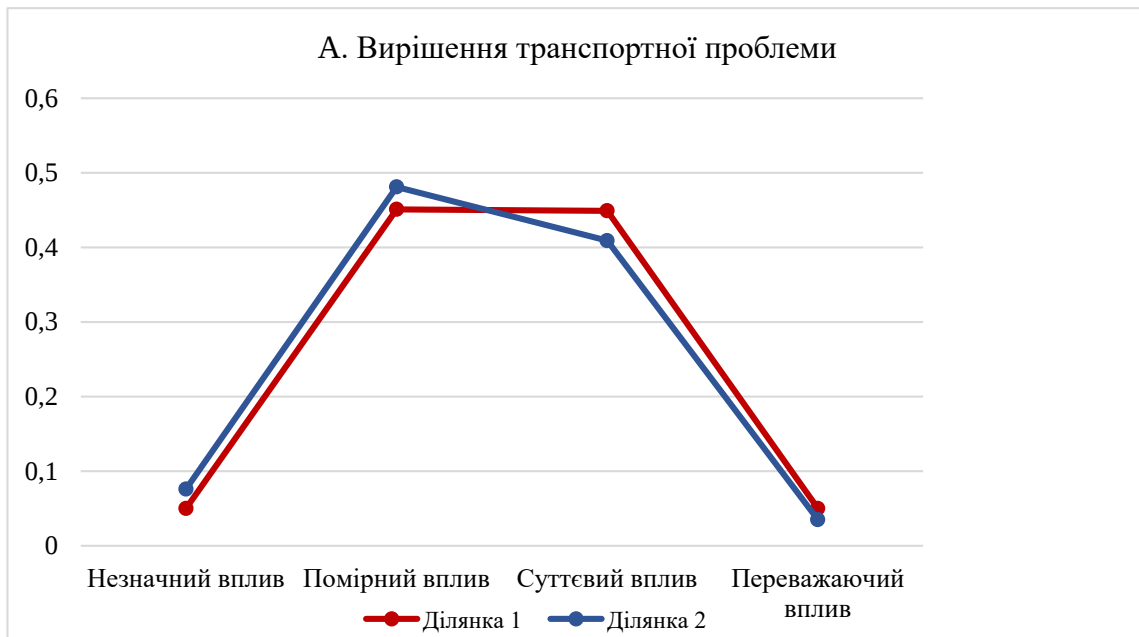


Рис. 3. Результати оцінювання варіантів за параметром «А. Вирішення транспортної проблеми»

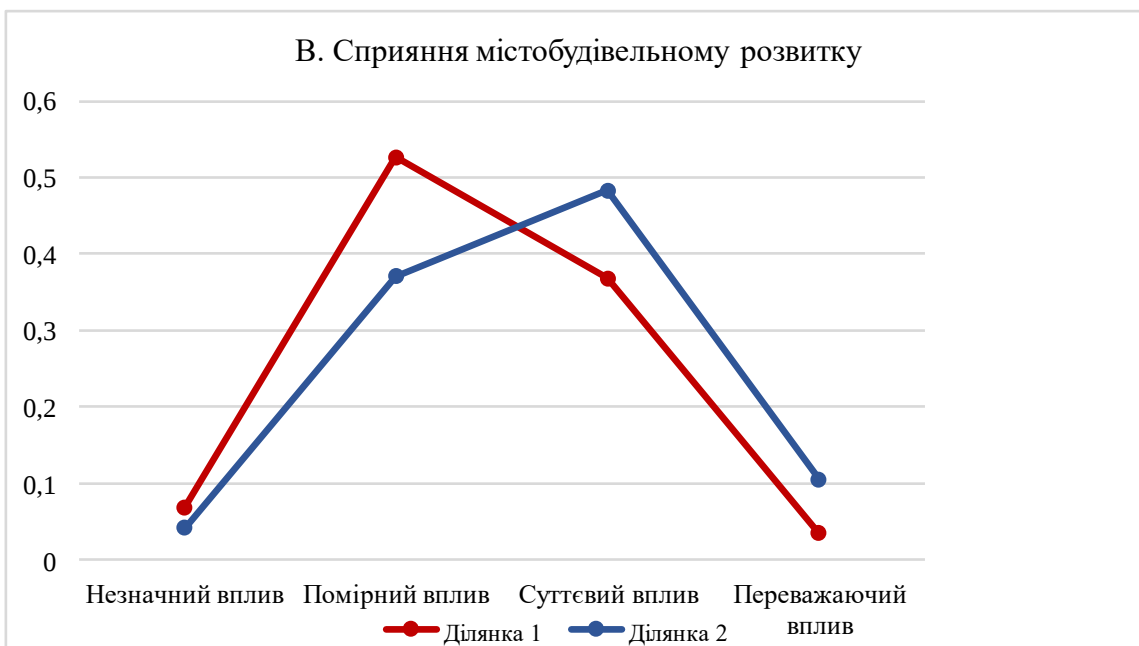


Рис. 4. Результати оцінювання ділянок за параметром «В. Сприяння містобудівельному розвитку»

Будівництво лінії метро вздовж південного узбережжя Одеси може значно активізувати інвестиції в будівництво, особливо в рекреаційну та туристичну інфраструктуру. Окрім розвитку наявних пляжних зон (площею до 56 га), можливе створення нових рекреаційних територій у південному напрямку, зокрема при подальшому продовженні лінії метро вздовж Фонтанської дороги. Часткове вирішення проблеми нестачі вільних земель можливе через заміну застарілих «хрущовок» та садибної забудови, хоча Генеральний план суттєво обмежує вибуття садибної забудови (на рівні 2,2%). Також перспективним є оновлення застарілих санаторіїв, готелів і баз відпочинку, які не відповідають сучасним стандартам і не витримують конкуренції з курортами сусідньої Туреччини.

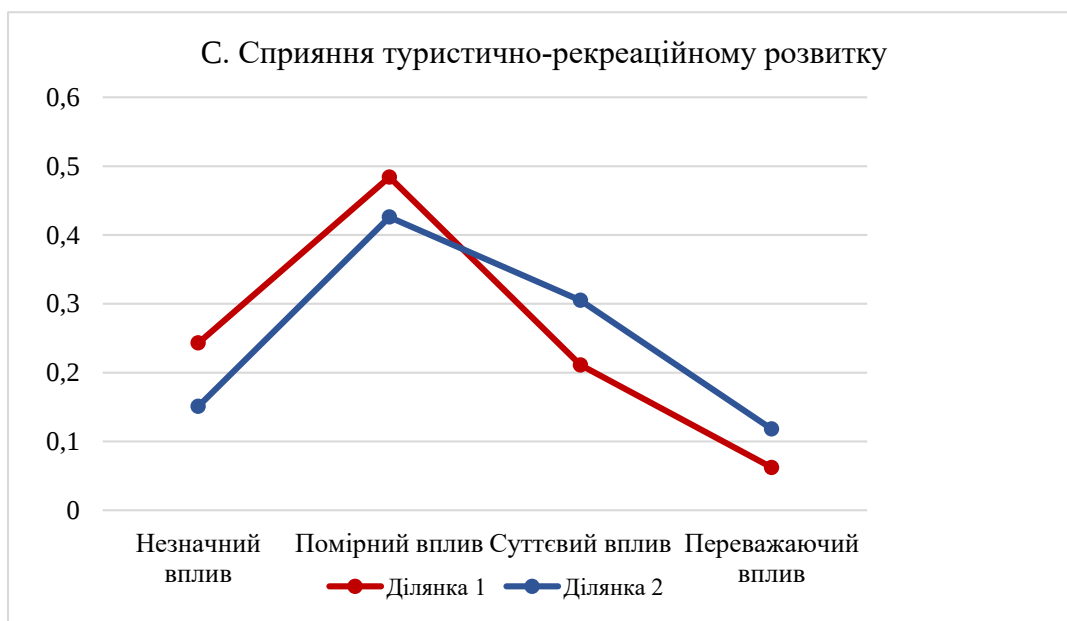


Рис. 5. Результати оцінювання ділянок за параметром «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку»

Параметр «D. Мінімізація екологічних проблем» є ключовим для досягнення цілей «зеленого переходу» та кліматичної нейтральності, до яких прагне і Україна. Оскільки до 80% міських викидів спричинені автотранспортом, запуск метрополітену здатен значно скоротити їхній обсяг за рахунок вдосконалення системи пасажирських перевезень. Відчутне екологічне покращення прогнозується на обох маршрутах (рис. 6). Проте більш суттєвіший ефект очікується на ділянці 2 завдяки її близькості до моря, природних і курортних зон, зокрема Аркадії.

За параметром «E. Цивільний захист населення» оцінки для обох ділянок є подібними, з незначною перевагою ділянки 2 (рис. 7). В обох випадках переважають альтернативи параметрів «значна або часткова невідповідність потребам цивільного захисту». Проте станції метро а перехідні тунелі, можуть стати ефективними укриттями для цивільного населення й туристів. Невелика перевага ділянки 2 пояснюється більшою кількістю садибної забудови без укриттів та наявністю рекреаційної зони, де потреба в захисті є особливо актуальною.

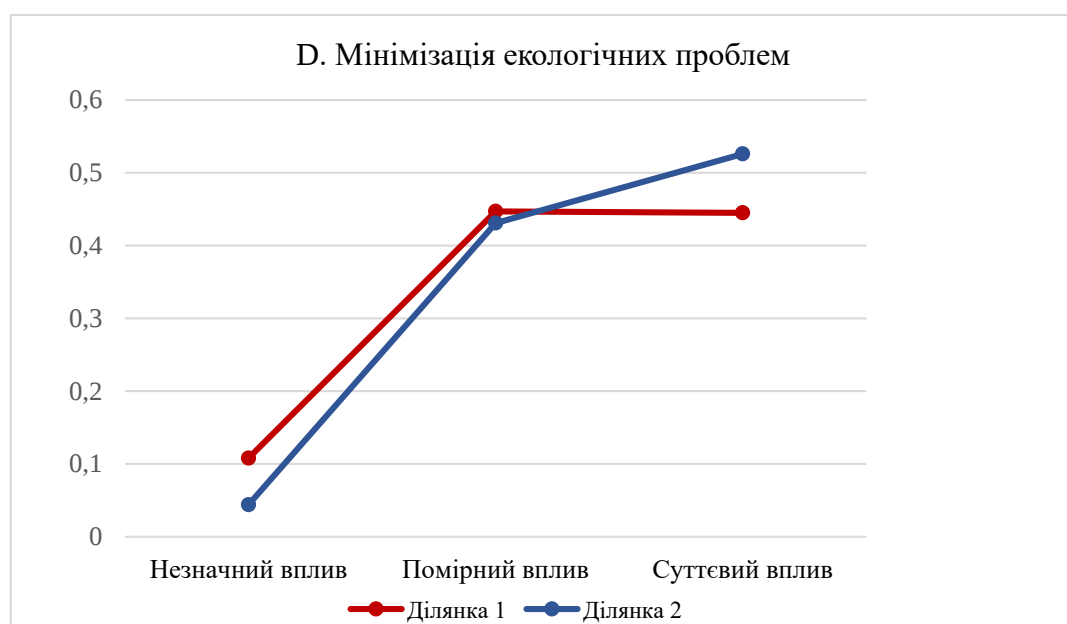


Рис. 6. Результати оцінювання ділянок за параметром «D. Мінімізація екологічних проблем»

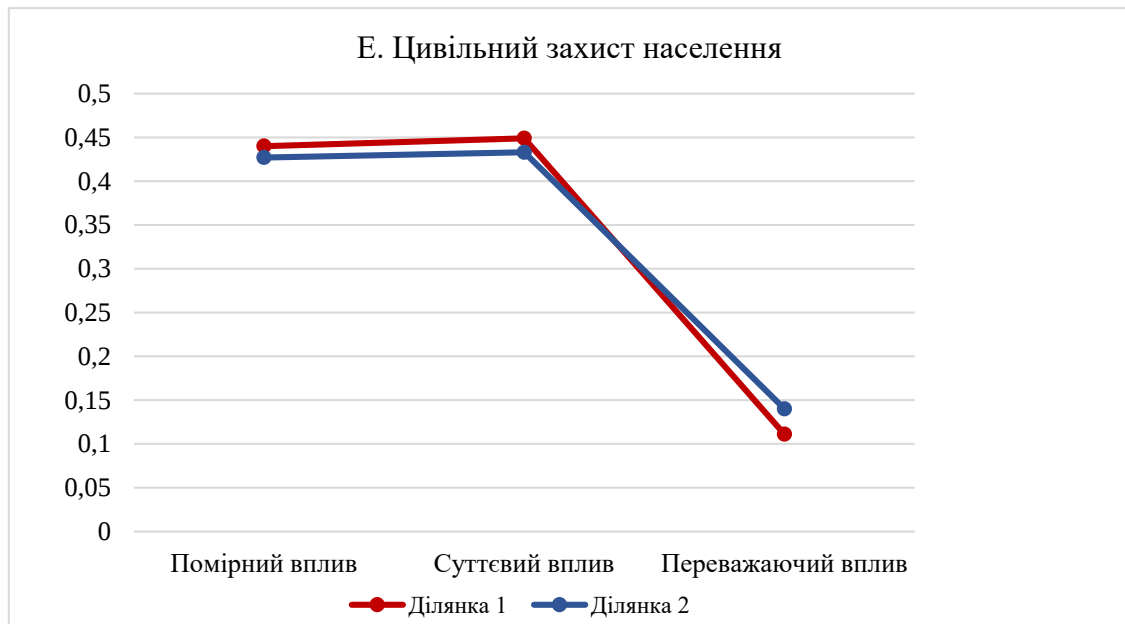


Рис. 7. Результати оцінювання ділянок за параметром «Е. Цивільний захист населення»

Для кращої візуалізації та порівняння впливу вибору ділянки на різні фактори було введено узагальнюючий коефіцієнт $w_{ratio} = (w_s + w_o) / (w_m + w_w)$. Він відображає відношення суми ваг альтернатив суттєвого w_s і переважаючого w_o впливу вибору ділянки на відповідний фактор, до суми ваг альтернатив помірної w_m і незначної w_w впливу вибору ділянки на аналогічний фактор. Чим вищий коефіцієнт, тим сильніший потенційний вплив вибору ділянки на відповідний фактор. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для обох ділянок представлені у вигляді діаграми на рис. 8.

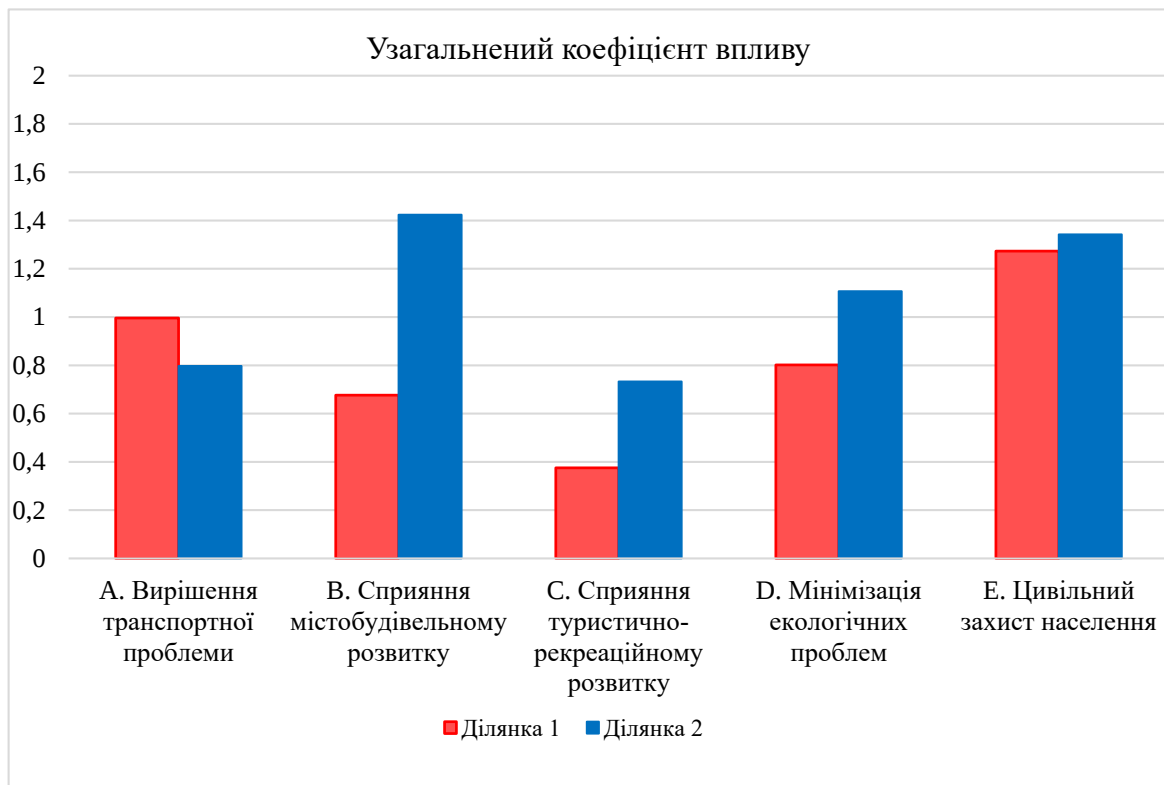


Рис. 8. Коефіцієнт впливу w_{ratio} обох ділянок для різних факторів

Результати моделювання свідчать, що альтернативна лінія метро (локація 2) краще узгоджується з ширшими ніж суто транспортними цілями стійкого міського планування. А саме з більшими інвестиційними перспективами будівництва, що зумовлено близькістю до моря, формуванням системи територій рекреаційного, оздоровчого та туристичного призначення, формуванням нових хабів для розміщення ділової активності, центр якої може переміститися з історичної в більш сучасну південно-східну частину Одеси. Також прибережна туристична й оздоровча зона потребує вирішення екологічних проблем, пов'язаних з мінімізацією викидів вихлопних газів на перевантажених автомагістралях. Зручна, наближена до морських рекреаційних об'єктів лінія метрополітену здатна суттєво скоротити кількість приватного автотранспорту на південних магістралях, у першу чергу на проспекті Шевченка та Фонтанській дорозі. Це призведе до ліквідації автодорожніх корок, зменшення простоїв і аварій, збільшить середню швидкість автомобільного руху й скоротить викиди газів, що сприятиме покращенню екологічної ситуації в місті. Таким чином включення лінії метро в існуючу систему автомобільного транспорту та трамвайних перевезень суттєво покращить умови їх функціонування за рахунок розвантаження критичних напрямків, а також зробить прибережний район більш стійким до воєнних загроз.

Говорячи про оцінку економічного та соціального впливу на вибір другого варіанту розміщення лінії метро (локація 2), слід зупинитися на перспективах південно-західної частини міста. Вирішення транспортної проблеми району може бути пов'язане із створенням низки човникових маршрутів міського транспорту в напрямку захід-схід до станцій осової лінії метрополітену з утворенням тут транспортних вузлів. Це зменшить навантаження на основні автомагістралі в напрямку південь-північ (Люстдорфська дорога та вулиця Академіка Корольова), оскільки значна частина мешканців південно-західного району зможе користуватися метрополітеном, а також покращить свої можливості поїздки на працю чи відпочинок у південно-східну (приморську) частину міста. У разі подальшого розвитку Одеського метрополітену може бути збудована і лінія метро у напрямку Люстдорфської дороги (локація 1), але економічний вплив комплексного розвитку прибережної зони робить більш пріоритетною на сьогодні альтернативну лінію (локація 2).

Висновок. Повоєнний вихід Одеси на якісно новий рівень динамічного розвитку, вирішення багатьох транспортних, територіальних, екологічних, безпекових і соціальних проблем значною мірою може забезпечуватись будівництвом Одеського метрополітену. Очікувані по закінченню війни міжнародні інвестиції у великі інфраструктурні проєкти в Україні можуть дати шанс реалізації цьому довгоочікуваному будівництву. При цьому в середньостроковій перспективі можна розраховувати лише на будівництво однієї осової лінії метрополітену і важливо прийняти найбільш ефективне для розвитку міста рішення щодо її південного маршруту.

Серед перспективних напрямків структурування складних проблем і врахування багатьох критеріїв впливу слід зазначити модифікований авторами метод морфологічного аналізу, який знайшов застосування в складних задачах планування міст і розглядається як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. Розроблена системна методологія та інструментарій прийняття планувальних рішень у сфері підземної урбаністики та досвід застосування планувальних методик, що використовують наукове передбачення майбутнього розвитку міста були використані для побудови морфологічної моделі ділянок Одеського метрополітену. Аналіз результатів дає підстави вважати напрямком лінії метрополітену в напрямку Проспекту Т. Шевченка і Фонтанської дороги (ділянка 2) більш перспективним і пріоритетним, ніж базовий варіант у напрямку Люстдорфської дороги (ділянка 1). При цьому вирішення транспортної проблеми південних районів міста ув'язується з інвестиційними перспективами будівельного розвитку, формуванням цілісної системи територій рекреаційно-оздоровчого та туристичного призначення (яка могла б конкурувати з сусідніми країнами), формування нових ділових центрів для часткового переміщення ділової активності, комунікаційних і господарсько-управлінських функцій з історичного центру міста в його південну частину, створення непорушної єдиної тканини

міської спільноти та її соціальної інтеграції, а також більшої стійкості в умовах війни.

Розглянута морфологічна модель може бути доповнена системою інженерно-геологічних факторів впливу, розглянуті в ній параметри та їх альтернативи, а також вихідні фактори системного аналізу можуть доповнюватись і уточнюватись. Це дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективний інструмент для прийняття проєктних рішень, виходячи із системних позицій.

Література

1. Herlihy P.. *Odessa: a History 1794-1914*. Cambridge: Harvard Ukrainian Research Institute, 1991. 432 p.
2. Lecke M., Sicher E. *Cosmopolitan Spaces in Odesa: A Case Study of an Urban Context (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2023. 400 p.
3. Twain M. *The Innocents Abroad*. Wordsworth Editions, 2010. 464 p.
4. Пилявский В. *Архитектура Одессы: стиль и время*. Одесса: Optimum, 2010. 137 с.
5. Herlihy P. *Odessa Recollected: The Port and the People (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2019. 256 p.
6. Лапкін О. Проблеми транспортної інфраструктури Одеси та проєкти для їх вирішення. *Вісник ОНМУ*. 2019. Вип. 3 (60). С. 109–123. doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-109-123
7. Мироненко С.В., Венгер А.С. Дослідження транспортної структури міста Одеси. *Автомобільний транспорт*. 2017. №41. С. 105-109. doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.105
8. Генеральний план м. Одеси. Електронний ресурс. URL: <https://omr.gov.ua/ua/city/departments/uag/generalniy-plan-g-odessi/>
9. Glazebrook G., Newman P. The City of the Future. *Urban Planning*. 2018. 3(2). P. 1–20. doi.org/10.17645/up.v3i2.1247
10. Litman T. *Evaluating public transit benefits and costs: Best Practices Guidbook*. Victoria Transport Policy Institute, 2010. 141 p.
11. Spieler C. *Trains, Buses, People: An Opinionated Atlas of US transit*. Washington, DC: Island Press, 2018. 264 p.
12. Бондар Н. *Розвиток транспортної інфраструктури України на засадах державо-приватного партнерства: монографія*. К.: НТУ, 2014. 336 с.
13. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій: Монографія*. К.: Наукова думка, 2020. 134 с.
14. Pardo C.F. Sustainable urban transport. In: *Shanghai Manual – A Guide for Sustainable Urban Development in the 21st Century*. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), 2010. P. 145–208.
15. Hollander J.B. *The First City on Mars: An Urban Planner's Guide to Settling the Red Planet*. Springer, 2022. 286 p.
16. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. *System analysis: Theory and Applications*. Springer, 2007. 475 p.
17. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. *Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування*. К.: Наукова думка, 2015. 245 с.
18. Haiko H., Savchenko I. Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. In Springer book M. Zgurovsky and N. Pankratova (eds.), *System Analysis & Intelligent Computing*. Springer, 2022. P. 93–113. doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
19. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Morphological model for underground crossings of water objects. *System Research & Information Technologies*. 2021. № 4. P. 53–67. doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04.
20. Ritchey T. *Futures Studies using Morphological Analysis*. Adapted from an article for the UN University Millennium Project: *Futures Research Methodology Series*, 2015. URL: <https://swemorph.com/pdf/futures.pdf>.

21. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Springer, 2024. 256 p. doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1.
22. Haiko H., Hollander J. B. & Savchenko I. Priority ranking of alternative Odesa metro plan variants: using modified morphological analysis method. International Journal of Urban Sciences. 2025. <https://doi.org/10.1080/12265934.2025.2452509>.
23. Гайко Г.І., Ган А.Л., Вапнічна В.В., Матвійчук І.О. Аналіз прогресивних конструктивних рішень підземних споруд цивільного захисту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2024, № 26. С. 31-40. <http://btttrp.diit.edu.ua/issue/view/18555>.
24. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.). Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC Technology center, 196. 2021. doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.

References

- [1] P. Herlihy, *Odessa: a History 1794-1914*. Cambridge: Harvard Ukrainian Research Institute, 1991.
- [2] M. Lecke, E. Sicher, *Cosmopolitan Spaces in Odesa: A Case Study of an Urban Context (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2023.
- [3] M. Twain, *The Innocents Abroad*. Wordsworth Editions, 2010.
- [4] V. Pilyavskiy, *Arkhitektura Odessy: stil' i vremya*. Odessa: Optimum, 2010.
- [5] P. Herlihy, *Odessa Recollected: The Port and the People (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2019.
- [6] O. Lapkin, "Problemy transportnoyi infrastruktury Odesy ta proiekty iikh vyrishennia", *Visnyk ONMU*, 3(60), pp. 109-123, 2019. doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-109-123.
- [7] S.V. Myronenko, A.S. Venger, "Doslidzhennia transportnoyi struktury mista Odesy", *Avtomobilnyi transport*, vol. 41, pp. 105-109, 2017. doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.105.
- [8] Heneralnyi plan m. Odesy. [Online]. Available: <https://omr.gov.ua/ua/city/departments/uag/generalniy-plan-g-odessi/>. Accessed on September 21, 2024.
- [9] G. Glazebrook, P. Newman, "The City of the Future", *Urban Planning*, 3(2), pp. 1-20, 2018. doi.org/10.17645/up.v3i2.124.
- [10] T. Litman, *Evaluating public transit benefits and costs: Best Practices Guidbook*. Victoria Transport Policy Institute, 2010.
- [11] C. Spieler, *Trains, Buses, People: An Opinionated Atlas of US transit*. Washington, DC: Island Press, 2018.
- [12] N. Bondar, *Rozvytok transportnoyi infrastruktury Ukrainy na zasadakh derzhavopryvatnoho partnerstva: monohrafiia*. Kyiv: NTU, 2014.
- [13] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko. *Rozvytok pidzemnoyi urbanistyky iak systemy al'ternatyvnykh proiektnykh konfihuratsii: Monohrafiia*. Kyiv: Naukova dumka, 2020.
- [14] C.F. Pardo, "Sustainable urban transport". In: *Shanghai Manual – A Guide for Sustainable Urban Development in the 21st Century*. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), pp. 145-208, 2010.
- [15] J.B. Hollander, *The First City on Mars: An Urban Planner's Guide to Settling the Red Planet*. Springer, 2022.
- [16] M.Z. Zgurovsky, N.D. Pankratova, *System analysis: Theory and Applications*. Springer, 2007.
- [17] N.D. Pankratova, I.O. Savchenko, *Morfolohichniy analiz. Problemy, teoriia, zastosuvannia*. Kyiv: Naukova dumka, 2015.

- [18] H. Haiko, I. Savchenko, "Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model", In: M. Zgurovsky and N. Pankratova (eds.), *System Analysis & Intelligent Computing*. Springer, pp. 93–113, 2022. doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
- [19] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko, "Morphological model for underground crossings of water objects", *System Research & Information Technologies*, vol. 4, pp. 53-67, 2021. doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04.
- [20] T. Ritchey, "Futures Studies using Morphological Analysis", Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2015. [Online]. Available: <https://swemorph.com/pdf/futures.pdf>. Accessed on September 21, 2024.
- [21] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko, *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Springer, 2024. doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1.
- [22] H. Haiko, J. B. Hollander & I. Savchenko, "Priority ranking of alternative Odesa metro plan variants: using modified morphological analysis method", *International Journal of Urban Sciences*, 2025. <https://doi.org/10.1080/12265934.2025.2452509>.
- [23] H.I. Haiko, A.L. Han, V.V. Vapnichna, I.O. Matviichuk, "Analysis of progressive design solutions for underground civil protection structures", *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 2024 (26), pp. 31-40. <http://bttpr.diit.edu.ua/issue/view/18555>.
- [24] I. Nazarenko, O. Dedov, I. Bernyk et. al., Nazarenko, I. (Ed.). *Dynamic processes in technological technical systems*. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 196, 2021. doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.

SYSTEM ANALYSIS OF THE ALTERNATIVE PROJECT CONFIGURATIONS OF THE AXIAL LINE OF THE ODESA SUBWAY

¹**Kovrov A.V.**, PhD, Professor,
 rektor@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6037-6080
¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
 Didrikhson st., 4, Odesa, 65029, Ukraine
²**Haiko H.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
 h.haiko@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-4263-5958
²**Savchenko I.O.**, PhD,
 savil.ua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0921-5425
²*National Technical University of Ukraine*
"Thor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
 Beresteisky ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine
³**Nazarenko I.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
 ii_nazar@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1888-3687
³*Kyiv National University of Construction and Architecture*
 Air Forces ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine
⁴**Hollander J.**, Doctor of Architecture, Professor,
 justin.hollander@tufts.edu, ORCID: 0000-0001-5148-7902
⁴*Tufts University*,
 Boston alley, 506, Medford, MA, 02155, USA

Abstract. One of the most topical, yet insufficiently researched complex global problems is the regulation of urban space development, with the purpose of increasing comfort, ecological standards, life safety in constantly growing metropolises. The sustainable development concept for urban space highlights the capacity of the underground space to take on the functions of the most critical underground objects and communications, ensuring the minimization of the logistical, safety

and ecological problems, that in case of Odesa can be largely achieved by the construction of an axial (north to south) line of the Odesa subway. The post-war restoration of Odesa will provide the new opportunities for implementation of large infrastructural projects on the base of international partnership, including the construction of the subway.

The goal of the research is the systemic comparative evaluation of the alternative project configurations for the axial Odesa subway line, particularly its southern part.

The modified morphological analysis method was chosen to be the core method for the research, as it is an efficient system methodology tool under conditions of multi-criteria impacts and high uncertainty. The developed system methodology, and the planning decision-making tool set for underground urban development, as well as the experience of using planning methodologies that employ scientific foresight of the future city development, were involved in the construction of the morphological model for the Odesa subway locations.

The constructed morphological model allowed to assess the impact of 10 structural and functional factors, and process over 349 000 configurations of values to obtain the numerical estimates, and compare the alternative locations for the end stations of the Odesa subway. The impact on solving the transport problem, the promotion of the city development, the promotion of the recreational tourism development, the minimization of ecological problems, civil defense of society were considered. This provides the city government, the state authorities, the interested public organizations and investors with an efficient tool to make planning decisions based on systemic positions.

Keywords: underground construction, transport infrastructure, subway, system analysis, morphological model.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2025

This work © 2025 by Kovrov A.V., Haiko H.I., Savchenko I.O., Nazarenko I.I., Hollander J. is licensed under CC BY 4.0