

DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241820>

УДК 519.876.2

**Н.Д. Панкратова, д.т.н., чл.-кор. НАНУ,**  
ORCID: 0000-0002-6372-5813

**Г.І. Гайко\*, д.т.н., проф.,**  
ORCID: 0000-0002-4263-5958

**І.О. Савченко, к.т.н.**  
ORCID: 0000-0002-0921-5425

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\* Відповідальний автор: [gaiko.kpi@meta.ua](mailto:gaiko.kpi@meta.ua)

Стаття подана 17.09.2021; Стаття прийнята 29.09.2021

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТІВ РОЗВИТКУ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕГАПОЛІСІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ<sup>1</sup>

**Мета:** визначення пріоритетності будівництва об'єктів підземної транспортної інфраструктури на основі системної методології з урахуванням геологічних і структурно-функціональних факторів.

**Завдання:** розробка інструментарію для оцінювання пріоритетності будівництва трас автомобільних тунелів шляхом оцінки морфологічних моделей з урахуванням впливів на екологічну й техногенну безпеку урбанізованих територій, а також впливу цих об'єктів на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків.

**Методи дослідження:** модифікований морфологічний аналіз геологічного середовища, урбанізованих територій і транспортної інфраструктури ділянок мегаполісу, метод експертних оцінок.

**Основні результати:** апробовано морфологічну модель як набір інструментів для оцінки пріоритетності будівництва об'єктів підземної транспортної інфраструктури; побудовані взаємопов'язані морфологічні таблиці для геологічного середовища та структурно-функціональних факторів урбанізованих територій в районі трас тунелів; проведено оцінювання моделей розвитку підземної інфраструктури на прикладі проектних трас автомобільних тунелів міста Києва, обґрунтовано впливи тунелів на зменшення екологічних і техногенних ризиків урбанізованого простору й обрано пріоритетний об'єкт будівництва за цими критеріями.

**Наукова новизна:** вперше цільовою функцією морфологічної моделі розвитку підземної транспортної інфраструктури мегаполісів є мінімізація екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору; отримані системні характеристики міських територій, які свідчать про ступінь сприятливості геологічного середовища та структурно-функціональних факторів для будівництва автомобільних тунелів у середмісті мегаполісу, розроблено й апробовано ваговий коефіцієнт впливу, який синтезує результати морфологічного аналізу й дозволяє визначити пріоритетність будівництва об'єктів транспортної інфраструктури за впливом на екологічні та техногенні ризики.

**Висновки та практичне значення:** створення методології та інструментарію для оцінки пріоритетності об'єктів підземного будівництва на передпроектній стадії, можливості врахування екологічних й техногенних ризиків розвитку урбаністичного простору мегаполісів шляхом послідовного будівництва об'єктів підземної транспортної інфраструктури і визначення черговості такої послідовності.

**Ключові слова:** планування міст; екологічні ризики; техногенні ризики; підземна інфраструктура; автомобільні тунелі; системна методологія; морфологічний аналіз; пріоритетність будівництва.

<sup>1</sup> Представлені результати отримані в рамках проекту Наукового фонду досліджень України 2020.01/0247 «Інструментарій планування підземної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору на основі системної методології».

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Регулювання міського розвитку з метою підвищення екологічних стандартів і безпеки життєдіяльності в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найбільш актуальних і водночас недостатньо досліджених та складних для розв'язання світових проблем [1]. Сучасні підходи до розвитку міського середовища значну увагу приділяють можливостям підземного простору взяти на себе функції найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об'єктів і комунікацій, забезпечуючи мінімізацію екологічних та техногенних ризиків великих міст [2–5]. Концепція сталого розвитку змінює минулу (past trend) тенденцію будівництва окремих підземних споруд як локальних об'єктів на масштабні проекти системного використання підземного простору як невід'ємної частини загального урбанізованого середовища. Це дозволяє комплексно вирішувати актуальні проблеми мегаполісів: територіальні, транспортні, енергетичні, екологічні, соціальні.

Підземна урбаністика є складною системою в багатьох аспектах. Вона складається з численних взаємопов'язаних підсистем і об'єктів, причому процеси, що протікають в цій системі і при будівництві, і при функціонуванні, також складні і в деяких випадках важко передбачувані, оскільки пов'язані зі змінним геологічним середовищем і численними факторами структурно-функціонального характеру урбаністичного простору. Тому проблеми, які супроводжують використання підземного простору великих міст, можна віднести до слабкоструктурованих проблем з низкою невизначеностей, підходи до вирішення яких доцільно ґрунтувати на системній методології [6].

Слід зазначити, що окремі приклади навіть вдалих планів територіального розвитку підземної урбаністики (приміром у м. Гельсінкі це понад 400 пов'язаних підземних об'єктів [7, 8]), складно застосувати в умовах іншого урбаністичного простору, відмінного геологічного середовища та вже сформованої специфічної підземної інфраструктури, на яку треба спиратися. Це потребує створення універсального системного інструментарію для планування підземного простору мегаполісів, який буде враховувати ідеологію, структурні, природні й техногенні особливості розвитку об'єктів планування для різних міст.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Окремі праці, спрямовані на розгляд системних підходів при розвитку підземного будівництва здебільшого не йшли далі загальних рекомендацій та постановки задач системних досліджень і не були зосереджені на проблемах екології та безпеки суспільства в мегаполісах [9]. Більш розвинені системні підходи для планування міст на денній поверхні [10] не можуть бути прямо перенесені на підземний простір, оскільки тут різко зростає вплив геологічного середовища й специфіка геобудівельних технологій. Сучасний розвиток методології прикладного системного аналізу відкриває нові перспективи для планування підземної інфраструктури великих міст [6, 11]. Адаптація цих методів до урбаністичних проблем, зокрема для оцінки сприятливості територій міста підземному будівництву [11–13] дозволила отримати ефективні інструменти планування підземного простору у взаємодії з інженерно-геологічним середовищем, проте екологічна та безпекова складові розвитку підземної інфраструктури залишалися поза увагою дослідників. Важливим невирішеним питанням системного підходу до планування урбаністичного середовища залишається визначення пріоритетності будівництва тих чи інших підземних комплексів з урахуванням впливів на екологічні та техногенні ризики.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка інструментарію, що включає методи і моделі на основі системної методології для оцінювання пріоритетності будівництва міських підземних об'єктів з урахуванням геологічних і структурно-функціональних факторів, а також впливу цих об'єктів на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

**Опис методики проведення дослідження.** Зазначені задачі потребують використання й подальшого розвитку методології та інструментарію планування підземного простору мегаполісів з системних позицій, зокрема із застосуванням методу морфологічного аналізу

[14, 15]. В роботі використовується модифікований метод морфологічного аналізу (МММА) з двоетапною процедурою, описаною в [6]. Зазначений метод є потужним інструментом оцінювання складних об'єктів і систем з великим набором взаємопов'язаних характеристик, в тому числі якісних, яким притаманна суттєва невизначеність. В основі методів лежить експертне оцінювання, яке на першому етапі прийняття рішення часто є головним джерелом інформації щодо об'єкта.

В поставленій задачі можна виділити два напрямки аналізу об'єкта дослідження: аналіз геологічних, і аналіз структурно-функціональних факторів. Для аналізу геологічних факторів використовувалась мережа з двох морфологічних таблиць (МТ), яка була розроблена авторами раніше [12], з певними змінами для врахування особливостей тунелів як підземних об'єктів:

- суттєво збільшено вплив альтернативи «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні» на неможливість побудови об'єкта;

- змінені діапазони параметрів «В. Масштаб об'єкта» і «С. Глибина закладання» в МТ рішень з урахуванням особливостей класу підземних об'єктів, що розглядаються (тунелі);

- змінений набір альтернатив параметра «D. Фактор ризику», оскільки частина факторів ризику тепер розглядається в рамках аналізу структурно-функціональних параметрів.

Другим напрямком аналізу було врахування впливів структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз. Для цієї задачі також застосовувався двоетапний МММА. Було сформовано групу техногенних і екологічних ризиків, які можна мінімізувати шляхом будівництва тунелів:

P1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів);

P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, лягання трамваїв та ін.);

P3. Дорожні затори (зменшення середньої швидкості руху, порушення функції транспорту, підвищенні викиди шкідливих газів);

P4. Дорожні аварії (транспортний колапс, травмування людей).

Обрана група ризиків певною мірою визначила побудову МТ для аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою МММА.

Побудована МТ першого етапу містить 8 параметрів, які є найбільш важливими для визначення доцільності тунелю і його впливу на мінімізацію різного роду ризиків:

1) тип забудови в районі потенційного тунелю – цей параметр впливає в першу чергу на вагомість різних факторів ризику. Для житлової забудови, туристичних об'єктів, парків більшу вагу мають фактори забруднення повітря і шуму; для промислової забудови і незабудованих територій ця вага значно менша;

2) щільність житлової забудови – параметр доповнює попередній, тісно пов'язаний з рядом інших параметрів і теж визначає вагомість факторів ризику;

3) фактор середмістя – визначає, наскільки територію можна віднести до такої, що входить до середмістя або впливає на автомобільний рух у середмісті;

4) залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю – параметр впливає на вагомість факторів ризику – в першу чергу, аварій (більший ризик для пішоходів), також факторів шуму і забруднення. Також параметр впливає на здатність тунелю зменшити вплив факторів ризику, оскільки тунель створює менше можливостей для аварій і заторів, викликаних пішохідними переходами;

5) інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю – параметр першочергово впливає на доцільність побудови тунелю. Також є помітний вплив цього параметра на вагомість факторів ризику – чим інтенсивніший рух, тим більш важливим стає фактор заторів. При великій інтенсивності руху тунель значно вплине на всі фактори ризику – чим інтенсивніший рух буде переведено в тунель, тим менше буде вплив всіх розглядуваних факторів ризику;

6) середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю – параметр змінює вплив тунелю на фактори ризику: якщо швидкість була низька – тунель зменшує фактор забруднення і заторів, якщо швидкість була

висока – тунель зменшує фактор шуму і аварій. Також висока швидкість свідчить про вагомість фактору аварій – на високій швидкості аварії є більш небезпечними;

7) наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій зв'язаності наявність або відсутність заторів є дуже критичною. Відповідно, є зв'язок і в протилежний бік – якщо зв'язаність була погана, то побудова тунелю здійснює позитивний вплив на фактор заторів за рахунок розвантаження шляхів;

8) пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю (ширина доріг, наявність перехресть, в тому числі нерегульованих) – параметр впливає на доцільність побудови тунелю, вагомість фактору заторів – при поганій пропускній здатності наявність або відсутність заторів є дуже критичною, потенційний тунель здійснює позитивний вплив на фактор заторів і аварій.

Для другого етапу МММА побудована МТ, яка показує доцільність побудови тунелю зі структурно-функціональної точки зору, а також профіль території потенційного будівництва тунелю з точки зору екологічно-безпекових факторів, пов'язаних зі зменшенням ризиків. Для аналізу ризиків було виділено 5 параметрів: один з них порівнює між собою вагомість різних факторів ризику, його альтернативи формують «профіль» території з точки зору важливості різних факторів ризику, а інші чотири параметри описують здатність тунелю позитивно вплинути на зменшення кожної окремої з чотирьох розглядуваних груп ризику. Загалом МТ другого етапу містить такі параметри:

А. Доцільність тунелю (доцільний, недоцільний);

В. Вагомість факторів ризику на ділянці (забруднення повітря; шум і динамічні впливи; дорожні затори; дорожні аварії);

С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря» (не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує);

Д. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи» (не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує);

Е. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори» (не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує);

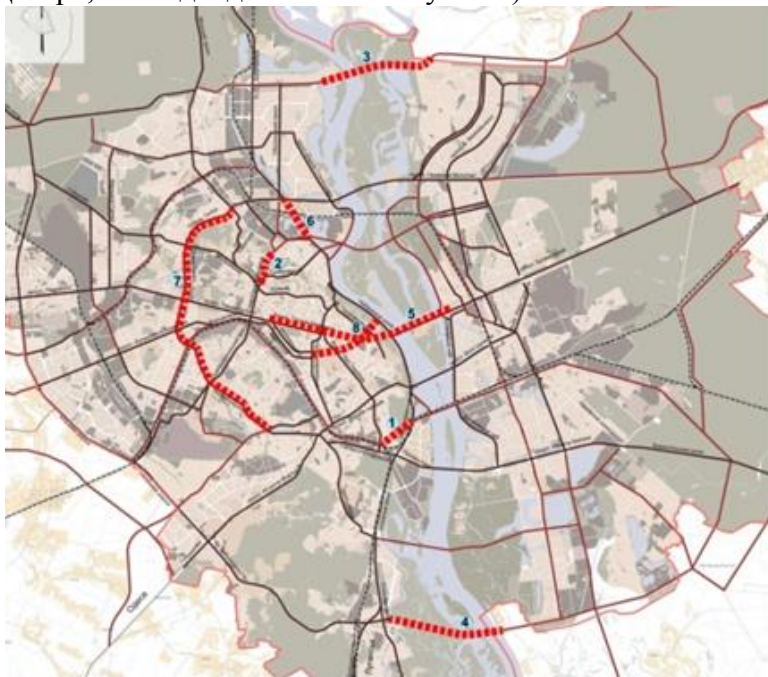
Ф. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії» (не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує).

Для імплементації розроблених процедур МММА використовувалось програмне забезпечення SAS Studio, для якого були написані користувацькі модулі мовою С# у середовищі Microsoft Visual Studio 2017. Експертним шляхом було оцінено вплив альтернатив першого етапу на параметри рішення, і після цього за допомогою процедури МММА були розраховані ваги альтернатив параметрів другого етапу з урахуванням можливості виникнення будь-якої з 524288 (для першої задачі) і 41472 (для другої задачі) потенційних конфігурацій МТ першого етапу. При цьому використовувались ймовірності виникнення конфігурацій, розраховані на першому етапі МММА. За цією методикою [6] отримані результати таблиць 1–3.

**Системне оцінювання моделей розвитку підземної інфраструктури на прикладі автомобільних тунелів у середмісті Києва.** Генеральний план розвитку Києва до 2025 р. передбачає будівництво 8 автомобільних тунелів, причому три з них пройдуть під Дніпром (рис. 1). Ці рішення розвитку інфраструктури Києва направлені не тільки на вирішення транспортних проблем столиці, але значним чином повинні вплинути на покращення екологічної ситуації, оскільки екологізовані тунелі відкривають можливість цілеспрямованого відведення й утилізації шкідливих викидів автотранспортних потоків [16]. Керуючись критерієм екологічної безпеки міста важливо проаналізувати траси запланованих тунелів і визначити пріоритетність (першочерговість) будівництва одного з тунелів, який здатен якнайбільше мінімізувати екологічні ризики.

Виходячи з необхідності вирішення найбільш актуальних проблем транспортної ситуації, яка склалася в місті, були розроблені морфологічні моделі двох автомобільних тунелів

Правобережного Києва (рис. 1) – тунель №1 (Національний Ботанічний сад ім. М. Гришка – Дарницький міст) і тунель №5 (Площа Перемоги – Дніпро, розглядалася ділянка лише до Дніпра, без підводної частини тунелю).



**Рисунок 1 – Схема трасування автомобільних тунелів (Генеральний план розвитку Києва до 2025 р.)**

На основі проведеної двохетапної процедури МММА були отримані оцінки результативностей рішення щодо інженерно-геологічних факторів (табл. 1).

З табл. 1 можна зробити висновок, що траси (геологічні середовища) двох розглянутих тунелів достатньо сприятливі для підземного будівництва (вага альтернативи «А.1. Придатна» суттєво перевищує вагу «А.2. Непридатна»), причому в приблизно рівній мірі для кожного з тунелів. Для тунелю 5, відповідно до його характеристик, оцінених в першій морфологічній таблиці, модель пропонує менші розміри перерізу і уможливує більшу глибину закладання (вага

альтернативи «С.4. глибше 60 м» складає 0,518 для тунелю 5 і 0,276 для тунелю 1), що пов'язано з рельєфом місцевості. Також дві розглянуті ділянки мають дещо різні профілі найбільш вірогідних ризиків – для тунелю 1 найбільш вірогідним є фактор ризику «D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів», вага якого складає 0,547, що суттєво перевищує наступний за значимістю фактор «D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд», вага якого складає 0,348.

**Таблиця 1 – Результати розрахунку оцінок альтернатив інженерно-геологічних факторів**

А. Придатність траси			В. Масштаб об'єкта			С. Глибина закладання тунелю		
Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5
А.1. Придатна	0,777	0,799	В.1. Переріз до 10 м <sup>2</sup>	0,643	0,712	С.1. 0–10 м	0,096	0,021
			В.2. Переріз до 25 м <sup>2</sup>	0,255	0,232	С.2. 10–20 м	0,183	0,100
А.2. Непридатна	0,223	0,201	В.3. Переріз до 40 м <sup>2</sup>	0,084	0,049	С.3. 20–60 м	0,445	0,360
			В.4. Переріз понад 40 м <sup>2</sup>	0,018	0,007	С.4. глибше 60 м	0,276	0,518
D. Фактор ризику			E. Ступінь ризику			F. Рівень ризику		
Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5	Альтернатива	Тунель 1	Тунель 5
D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності	0,039	0,046	E.1. <3%	0,089	0,050	F.1. 0,1–5% Q	0,212	0,137
D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації	0,348	0,417	E.2. 3–10%	0,598	0,584	F.2. 5–20% Q	0,701	0,768
D.3. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	0,067	0,111	E.3. 10–20%	0,274	0,308	F.3. 20–50% Q	0,079	0,085
D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів	0,547	0,426	E.4. 20–50%	0,031	0,044	F.4. >50% Q	0,008	0,010
			E.5. >50%	0,009	0,014			

Для тунелю 5 обидва цих фактори є приблизно рівнозначними (ваги складають 0,426 і 0,417 відповідно). Профілі ступеню (імовірності) та рівня (вартості наслідків) ризиків для двох тунелів достатньо близькі, з невеликим зміщенням тунелю 5 в сторону більших значень, тобто

вартість підтримання й можливих ремонтів тунелю 5 збільшується на 5-7% від тунелю 1 відносно загальної вартості будівництва тунелю. Таким чином фактор геологічного середовища, достатньо сприятливий для обох тунелів, не може бути визначальним для встановлення першочерговості будівництва тунелю.

Далі було проведено оцінювання структурно-функціональних факторів другої морфологічної таблиці (табл. 2). Тут наведені вхідні оцінки для двох розглянутих тунелів (стовпчик «Вхід»), а також по два набори оцінок, розрахованих з використанням різних наборів експертних даних, що враховують також дані першого етапу аналізу (фактори геологічного середовища). Відповідні стовпчики з розрахованими значеннями підписані «Експ1» і «Експ2».

**Таблиця 2 – Вхідні значення оцінок структурно-функціональних факторів тунелів і результати першого етапу МММА**

Параметр	Альтернативи параметра	Тунель 1			Тунель 5		
		Вхід	Експ1	Експ2	Вхід	Експ1	Експ2
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова	0,197	0,250	0,328	0,258	0,471	0,315
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	0,197	0,194	0,188	0,210	0,298	0,272
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	0,061	0,043	0,068	0,258	0,176	0,261
	1.4. Парки, зони відпочинку	0,242	0,219	0,320	0,210	0,053	0,152
	1.5. Промислова забудова	0,061	0,055	0,069	0,000	0,000	0,000
	1.6. Незабудовані території	0,242	0,240	0,028	0,065	0,002	0,000
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька	0,175	0,130	0,046	0,000	0,000	0,000
	2.2. Низька	0,400	0,450	0,100	0,121	0,039	0,000
	2.3. Середня	0,325	0,332	0,704	0,485	0,488	0,575
	2.4. Висока	0,100	0,088	0,150	0,394	0,473	0,425
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя	0,121	0,089	0,285	0,500	0,455	0,845
	3.2. Ділянка впливає на автомобільний рух у середмісті	0,394	0,401	0,164	0,500	0,545	0,155
	3.3. Ділянка поза середмістям	0,485	0,510	0,552	0,000	0,000	0,000
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька	0,233	0,152	0,054	0,100	0,007	0,001
	4.2. Низька	0,372	0,367	0,143	0,100	0,029	0,008
	4.3. Середня	0,302	0,381	0,598	0,400	0,414	0,427
	4.4. Висока	0,093	0,100	0,205	0,400	0,550	0,565
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька	0,093	0,165	0,046	0,000	0,000	0,000
	5.2. Середня	0,302	0,287	0,576	0,289	0,151	0,251
	5.3. Висока	0,372	0,390	0,345	0,356	0,418	0,595
	5.4. Дуже висока	0,233	0,157	0,034	0,356	0,431	0,154
6. Середня швидкість автомобільного руху в години «пік»	6.1. до 15 км/год	0,148	0,156	0,033	0,194	0,297	0,159
	6.2. 15-30 км/год	0,259	0,385	0,229	0,444	0,615	0,658
	6.3. 30-60 км/год	0,593	0,459	0,738	0,361	0,088	0,183
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана	0,129	0,110	0,036	0,325	0,216	0,243
	7.2. Погана	0,516	0,462	0,358	0,400	0,318	0,545
	7.3. Середня	0,226	0,246	0,326	0,175	0,252	0,134
	7.4. Добра	0,129	0,182	0,281	0,100	0,214	0,078
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю	8.1. Погана	0,233	0,211	0,119	0,361	0,367	0,536
	8.2. Середня	0,533	0,540	0,648	0,444	0,513	0,432
	8.3. Висока	0,233	0,250	0,233	0,194	0,120	0,033

За результатами цього оцінювання можна зробити певні порівняння двох ділянок:

– для ділянки тунелю 5 більшу частину території займає житлова, комерційна, адміністративна забудова, тоді як для тунелю 1 велику частку мають парки і незабудовані території. Відповідно, для ділянки тунелю 5 також суттєво вище щільність житлової забудови (параметр 2): основна вага припадає на альтернативи «Висока» і «Дуже висока»; для тунелю 1 більша частина ваги для цього параметра припадає на альтернативи «Середня», «Висока»;

– тунель 5 однозначно можна віднести до зони історичного середмістя і такого, що впливає на автомобільні шляхи у середмісті; ділянка тунелю 1 здебільшого знаходиться поза історичним осередком середмістя;

– залюдненість в районі ділянки тунелю 5 скоріше від середньої до високої (немає висотних житлових масивів); в районі тунелю 1 – скоріше від низької до середньої (за рахунок середньої щільності забудови, наявності паркових зон);

– інтенсивність автомобільного руху більше на ділянці тунелю 5, але в години «пік» швидкість руху тут менша порівняно з ділянкою тунелю 1;

– наземна зв'язаність і пропускна здатність автомобільних шляхів краща для ділянки тунелю 1.

На основі оцінок, наведених в табл. 2, і побудованої матриці зв'язків був проведений другий етап процедури МММА для оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних факторів. Для цього розрахунку також було задіяно два альтернативних набори експертних даних, результати розрахунку наведені в табл. 3.

Для зручності далі використовуються усереднені оцінки результатів двох моделей. За результатами оцінювання можна зробити ряд висновків щодо порівняння ділянок потенційного будівництва тунелів:

1) Будівництво обох тунелів є доцільним: вага альтернативи «А.1. Доцільний» суттєво перевищує вагу альтернативи «А.2. Недоцільний» (відповідно, 0,895 і 0,105 для тунелю 1 і 0,994 і 0,006 для тунелю 5). Це є цілком логічним результатом, оскільки для оцінювання взяті об'єкти Генерального плану розвитку Києва, вибір яких був попередньо обґрунтованим, проте для тунелю 5 інтегруючий фактор доцільності будівництва виявився на 10% більшим від тунелю 1.

**Таблиця 3 – Оцінювання наслідків впливу структурно-функціональних параметрів ділянок потенційного будівництва тунелів на екологічні й безпекові фактори**

Параметр	Альтернатива	Тунель 1		Тунель 5	
		Експ1	Експ2	Експ1	Експ2
А. Доцільність тунелю	А.1. Доцільний	0,897	0,893	0,988	0,999
	А.2. Недоцільний	0,103	0,107	0,012	0,001
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря	0,151	0,134	0,182	0,164
	В.2. Шум і динамічні впливи	0,127	0,205	0,137	0,165
	В.3. Дорожні затори	0,445	0,115	0,527	0,380
	В.4. Дорожні аварії	0,277	0,546	0,154	0,291
С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає	0,134	0,042	0,033	0,010
	С.2. Частково мінімізує	0,341	0,466	0,291	0,287
	С.3. Помірно мінімізує	0,322	0,300	0,389	0,327
	С.4. Суттєво мінімізує	0,204	0,193	0,287	0,376
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає	0,092	0,080	0,091	0,020
	D.2. Частково мінімізує	0,317	0,306	0,295	0,244
	D.3. Помірно мінімізує	0,374	0,349	0,380	0,361
	D.4. Суттєво мінімізує	0,217	0,265	0,233	0,375
E. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	E.1. Не впливає	0,030	0,185	0,006	0,013
	E.2. Частково мінімізує	0,398	0,486	0,280	0,193
	E.3. Помірно мінімізує	0,395	0,174	0,464	0,339
	E.4. Суттєво мінімізує	0,177	0,154	0,249	0,455
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає	0,090	0,079	0,038	0,007
	F.2. Частково мінімізує	0,315	0,367	0,315	0,438
	F.3. Помірно мінімізує	0,357	0,339	0,388	0,330
	F.4. Суттєво мінімізує	0,238	0,214	0,259	0,225

2) Структура найбільших факторів ризику дещо відрізняється для розглянутих наземних ділянок тунелів (результати розрахунку для параметра «В. Вагомість факторів ризику на ділянці» наведені у вигляді діаграм на рис. 2). Основною відмінністю між тунелями за факторами ризику є те, що для наземної ділянки тунелю 5 значно впливовішим є ризик дорожніх заторів, тоді як для ділянки тунелю 1 найбільший ризик стосується можливих дорожніх аварій, що пов'язано з підвищеною швидкістю руху. Ризик забруднення повітря вихлопними газами також більший для ділянки тунелю 5.

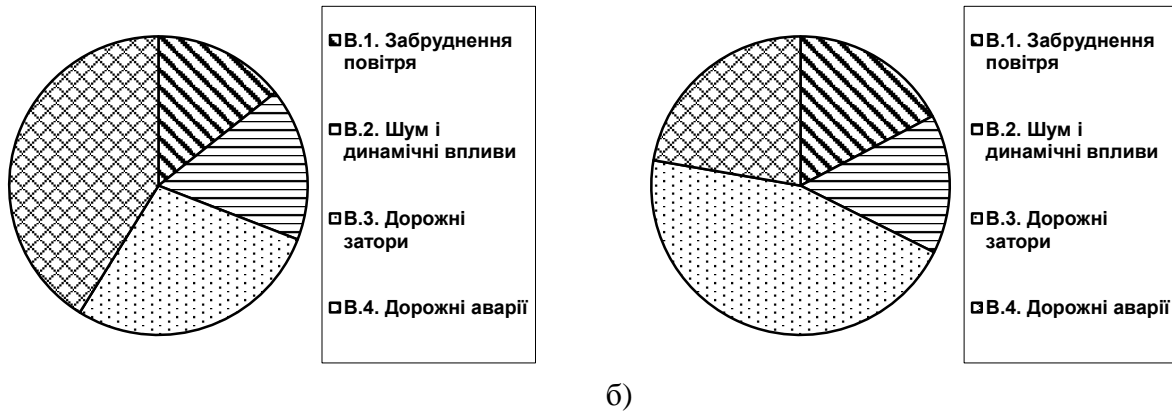


Рисунок 2 – Діаграми оцінок вагомості факторів ризику для ділянки тунелю 1 (а) і тунелю 5 (б)

3) Спорудження кожного з розглянутих тунелів забезпечить певною мірою мінімізацію розглядуваних факторів ризику, однак міра цього впливу залежить від конкретного тунелю і типу фактора ризику. Для всіх розглядуваних факторів ризику» оцінки впливу обох тунелів представлені на рис. 4.

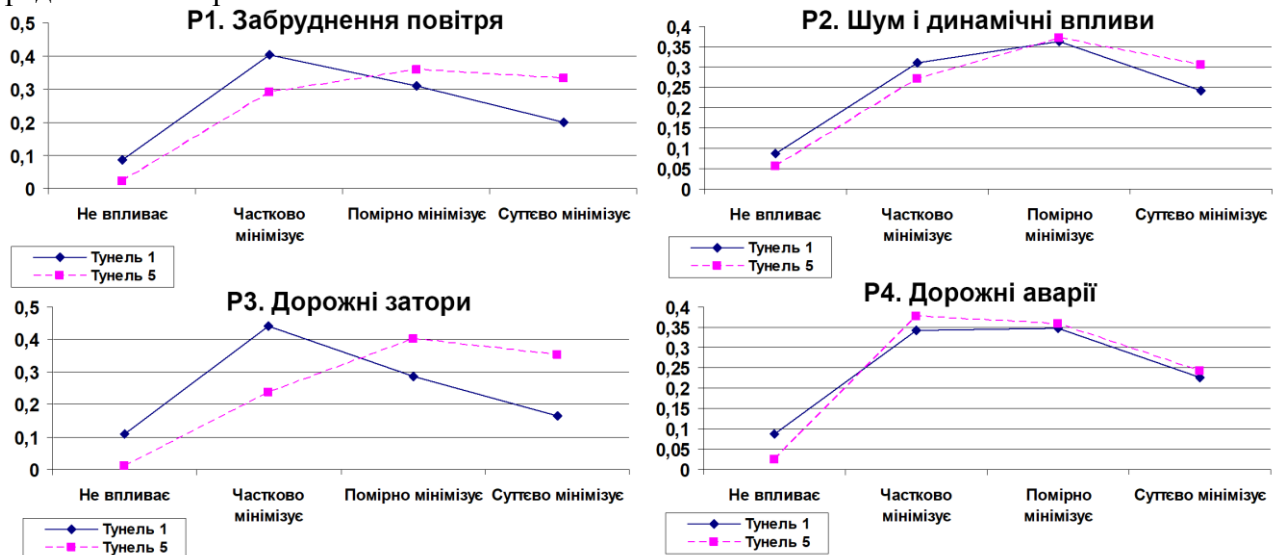


Рисунок 3 – Діаграми впливу тунелів на фактори ризику P1–P4

Аналізуючи наведені на рис. 3 графіки та оцінки з табл. 3, можна зробити наступні висновки:

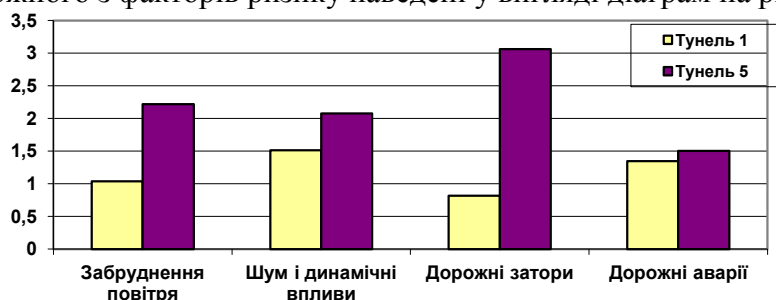
– вага альтернативи «Не впливає» є дуже малою, особливо для тунелю 5, що свідчить про великий потенціал підземного будівництва для екологізації транспортної інфраструктури. Цей факт також закономірно впливає з високої ваги альтернативи «А.1.» (доцільність тунелю), яка вже була відмічена раніше.

– у середньому тунель 5 сильніше впливає на мінімізацію факторів екологічного й безпекового ризиків існуючої наземної інфраструктури. Хоча для факторів «P2. Шум і динамічні впливи» і «P4. Дорожні аварії» перевага тунелю 5 незначна (в рамках похибки оцінювання), однак для найбільш значимих факторів «P1. Забруднення повітря» і «P3. Дорожні затори» перевага тунелю 5 стає очевидною. Якщо вплив тунелю 1 на ступінь мінімізації можна охарактеризувати як «частковий-помірний», то для тунелю 5 відбувається зміщення характеристики в зону «помірний-суттєвий».

Для порівняння впливу будівництва потенційних тунелів на різні фактори ризику введемо ваговий коефіцієнт впливу:  $w_{ratio} = (w_{medium} + w_{high}) / (w_{low} + w_{none})$ , який відображає відношення суми ваг альтернатив помірного  $w_{medium}$  і суттєвого  $w_{high}$  впливу будівництва тунелю на мінімізацію відповідного фактора ризику, до суми ваг альтернатив часткового  $w_{low}$  і



відсутнього  $w_{none}$  впливу будівництва тунелю на мінімізацію того ж фактора ризику. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний вплив потенційного будівництва тунелю на відповідний фактор ризику. Розраховані коефіцієнти  $w_{ratio}$  для обох ділянок і кожного з факторів ризику наведені у вигляді діаграм на рис. 4.



**Рисунок 4. Ваговий коефіцієнт впливу  $w_{ratio}$  для ділянок тунелів 1 і 5 для різних факторів ризику**

З наведеної на рис. 4 діаграми стає очевидною перевага тунелю 5, будівництво якого слід визначити найбільш пріоритетним для швидкого покращення транспортної та екологічної ситуації в середмісті Києва.

### ВИСНОВКИ та практичне значення

Системна методологія, її сучасні інструменти та модифікації відкривають нові можливості для планування міської інфраструктури з метою підвищення екологічних стандартів і безпеки життєдіяльності. Для надання підтримки прийняттю рішень щодо оцінки пріоритетності будівництва об'єктів підземної транспортної інфраструктури мегаполісів з урахуванням екологічних і техногенних ризиків розроблена й апробована морфологічна модель та інструментарій МММА. Результати обчислень представлені в наглядному й зручному вигляді, що підвищує користь розробленого інструментарію для муніципалітетів, інвестиційних груп і суспільних організацій, які опікуються розвитком міст. Створена модель пройшла тестування на проектних трасах автомобільних тунелів міста Києва, але є універсальною, з її допомогою можуть бути оцінені будь які інші території (траси) потенційного підземного будівництва у великих містах. При цьому у відповідності до особливостей урбанізованого простору конкретних міст і цільових задач дослідження фактори й діапазони морфологічних таблиць можуть бути доповнені та уточнені.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. United Nations, New York, 2019.
- [2] A. R. Berkowitz, C. H. Nilon, and K. S. Hollweg, *Understanding Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2003.
- [3] Е. В. Корендясева, *Экологические аспекты управления городом*. Москва: МГУУ Правительства Москвы, 2017.
- [4] P. H. Gilbert et al., *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington: The National Academies Press, 2013. <https://doi.org/10.17226/14670>
- [5] Г. Е. Голубев, *Подземная урбанистика и город*. Москва: МИКХиС, 2005.
- [6] Н. Д. Панкратова, Г. І. Гайко, та І. О. Савченко, *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проектних конфігурацій*. Київ: Наукова думка, 2020.
- [7] I. Vähäaho, "Underground space planning in Helsinki", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, no. 5, pp. 387-398, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
- [8] R. Sterling, H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J. P. Godard, I. Vähäaho, X. Shi, and T. Hanamura, "Sustainability issues for underground spaces in urban areas". *Proceedings of ICE. – Urban Design and Planning*, vol. 165, no. 4, pp. 241-254, 2012. <https://doi.org/10.1680/udap.10.00020>
- [9] Б. А. Картозия, "Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции". *Горный информационно-аналитический бюллетень*, №1, с. 615-629, 2015.

- [10] В. И. Ресин, и Ю. С. Попков, *Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
- [11] N. Pankratova, I. Savchenko, G. Gayko, and V. Kravets, "Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method". *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 50, no. 10, pp. 34-46, 2018. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i10.30>
- [12] Г. І. Гайко, І. О. Савченко, і В. В. Вапнічна, «Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору», *Геоінженерія*, вип. 4, с. 7-18, 2020. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.4.2020.219334>
- [13] Н. І. Haiko, I. O. Savchenko, and I. O. Matviichuk, "Development of a morphological model for territorial development of underground city space". *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 92-98, 2019. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
- [14] T. Ritchey, "General morphological analysis as a basic scientific modelling method". *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 126, pp. 81-91, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
- [15] G. Duczynski, "Morphological analysis as an aid to organisational design and transformation". *Futures*, vol. 86, pp. 36-43, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2016.08.001>
- [16] J. Cuia, and J. D. Nelson, "Underground transport: An overview". *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 87, pp. 122-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.003>

N.D. Pankratova, Dr. Sc., Corresponding Member  
of the National Academy of Science of Ukraine

ORCID: 0000-0002-6372-5813

H.I. Haiko\*, Dr. Sc., Professor

ORCID: 0000-0002-4263-5958

I.O. Savchenko, Cand. Sc.

ORCID: 0000-0002-0921-5425

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author: [gaiko.kpi@meta.ua](mailto:gaiko.kpi@meta.ua)

Received 17.09.2021; Accepted 29.09.2021

## IDENTIFYING DEVELOPMENT PRIORITIES OF UNDERGROUND INFRASTRUCTURE IN METROPOLISES USING SYSTEM METHODOLOGY

**Purpose:** Determining construction priorities of underground transport infrastructure objects by evaluating morphological models of car tunnels considering the impact on the ecological and technogenic safety of urbanized territories.

**Methodology:** modified morphological analysis of geological environment, urbanized territories and transport infrastructure of sites in a metropolis, expert estimation method.

**Findings:** a morphological model was tested as a tool set for determining construction priorities of underground transport infrastructure objects; inter-related morphological tables for geological environment and structural-functional factors of urbanized territories in a tunnel area were constructed; an estimation of models regarding development of underground infrastructure was conducted using the planned car tunnels in Kyiv as an example; the impact of tunnels on reducing the ecological and technogenic risks of urbanized space was justified, and the priority construction object was chosen according to these criteria.

**Originality:** for the first time the reduction of ecological and technogenic risks of urbanized space was chosen as a goal function in morphological models for the development of underground transport infrastructure in metropolises; the systemic characteristics of urban territories were obtained that describe the favorability of the geological environment and structural-functional factors for car tunnel construction in center metropolis areas; an impact ratio was proposed for synthesizing morphological analysis results and determining the priorities of underground transport infrastructure objects by influence on the ecological and technogenic risks.

**Practical implications:** the created methodology and tool set for determining priorities of underground object construction at the pre-project stage, the opportunity to consider the ecological and technogenic risks of

urban space development by consecutive construction of underground transport infrastructure objects and identifying an order for this sequence.

**Keywords:** city planning, ecological risks, technogenic risks, underground infrastructure, car tunnels, system methodology, morphological analysis, construction priority.

#### REFERENCES

- [1] *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. United Nations, New York, 2019.
- [2] A. R. Berkowitz, C. H. Nilon, and K. S. Hollweg, *Understanding Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2003.
- [3] E. V. Korendiaseva, *Ecological aspects of city management*. Moscow: MGUU of Moscow Government, 2017.
- [4] P. H. Gilbert et al., *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington: The National Academies Press, 2013. <https://doi.org/10.17226/14670>
- [5] G. E. Golubev, *Underground urbanistics and city*. Moscow: MIKHiS, 2005.
- [6] N. D. Pankratova, H. I. Haiko, and I. O. Savchenko, *Development of urban underground studies as a system of alternative project configurations*. Kyiv: Naukova dumka, 2020.
- [7] I. Vähäaho, “Underground space planning in Helsinki”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, no. 5, pp. 387-398, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
- [8] R. Sterling, H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J. P. Godard, I. Vähäaho, X. Shi, and T. Hanamura, “Sustainability issues for underground spaces in urban areas”. *Proceedings of ICE. – Urban Design and Planning*, vol. 165, no. 4, pp. 241-254, 2012. <https://doi.org/10.1680/udap.10.00020>
- [9] B. A. Kartosiya, “Developing underground space of large cities. New tendencies”. *Mining information-analytical bulletin (scientific technical journal)*, no. 1, pp. 615-629, 2015.
- [10] V. I. Resin, and Y. S. Popkov, *Development of large cities under conditions of transitional economy. System approach*. Moscow: Bookhouse «LIBROKOM», 2013.
- [11] N. Pankratova, I. Savchenko, G. Gayko, and V. Kravets, “Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method”. *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 50, no. 10, pp. 34-46, 2018. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i10.30>
- [12] H. I. Haiko, I. O. Savchenko, and V. V. Vapnichna, «Morphological model of development of underground infrastructure of large cities for minimization of ecological and technogenic risks of urbanistic space», *Geoengineering*, no. 4, pp. 7-18, 2020. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.4.2020.219334>
- [13] H. I. Haiko, I. O. Savchenko, and I. O. Matviichuk, “Development of a morphological model for territorial development of underground city space”. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 92-98, 2019. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
- [14] T. Ritchey, “General morphological analysis as a basic scientific modelling method”. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 126, pp. 81-91, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
- [15] G. Duczynski, “Morphological analysis as an aid to organisational design and transformation”. *Futures*, vol. 86, pp. 36-43, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2016.08.001>
- [16] J. Cuia, and J. D. Nelson, “Underground transport: An overview”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 87, pp. 122-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.003>