

Г.І. Гайко, д.т.н., проф.,  
І.О. Савченко, к.т.н.,  
В.В. Вапнічна, к.т.н., доц.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

## МОРФОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВЕЛИКИХ МІСТ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ УРБАНІСТИЧНОГО ПРОСТОРУ<sup>1</sup>

H. Haiko, Dr. Eng. Sc., Prof.,  
I. Savchenko, Cand. Eng. Sc.,  
V. Vapnichna, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## MORPHOLOGICAL MODEL OF DEVELOPMENT OF UNDERGROUND INFRASTRUCTURE OF LARGE CITIES FOR MINIMIZATION OF ECOLOGICAL AND TECHNOGENIC RISKS OF URBANISTIC SPACE

**Мета.** Розробка морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст (зокрема протяжних підземних споруд транспортного призначення) для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору.

**Завдання.** Використовуючи методологію модифікованого морфологічного аналізу розробити систему морфологічних таблиць, які б враховували впливи факторів геологічного середовища та структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз.

**Результат дослідження.** Побудовані морфологічні таблиці інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва тунелю, елементів рішення щодо траси тунелю, параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори та матриця взаємозв'язків між цими параметрами. Проведений експеримент зі штучним підвищенням ймовірності альтернативи «Наявні підтоплення та/або пливуні» дозволив оцінити ступінь реакції морфологічних моделей на цей впливовий фактор.

**Наукова новизна.** Вперше цільовою функцією морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст є мінімізація екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. Запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю для формування експертних оцінок. Визначено вплив фактору «Наявні підтоплення та/або пливуні» на зміну сприятливості ділянки (траси тунелю) підземному будівництву.

**Висновки та практична значимість.** Розроблена морфологічна модель відкриває можливості для системного аналізу транспортної інфраструктури мегаполісу і оцінки доцільності передачі частини транспортних функцій автомобільним тунелям на територіях запланованих трас.

**Ключові слова:** ризики урбаністичного простору, підземна інфраструктура мегаполісу, автомобільні тунелі, геологічне середовище, структурно-функціональні зв'язки, морфологічна модель.

<sup>1</sup> Робота виконана в рамках проекту 2020.01/0247 Національного фонду досліджень України.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Середній рівень урбанізованості сягає 82% у США та 73% у країнах Європи (в Україні – понад 71%), причому захищеність і здоров'я міського населення значною мірою визначається техногенною та екологічною безпекою урбаністичного простору. 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]. Найбільш характерними загрозами міського середовища є забруднення повітря викидами автомобільного транспорту, динамічні та шумові прояви, негативні впливи промислових зон, сховищ відходів і сміття, прориви в системах каналізації, водо- та енергопостачання, перевантаженість очисних споруд, транспортні аварії та дорожні затори, зсувні явища та інші небезпечні процеси геологічного середовища, що привертає постійну увагу дослідників та екологічних організацій [2], [3]. Світові концепти екологізації 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 [4]-[6]. Традиційне освоєння міського підземного простору пов'язане з розповсюдженою тенденцією будівництва окремих підземних споруд як локальних об'єктів. Концепція сталого розвитку змінює масштаб інженерних проектів і передбачає створення системної методології планування розвитку підземної інфраструктури як одного з ефективних шляхів екологізації міста.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Окремі праці, спрямовані на розгляд системних підходів при розвитку підземного будівництва не йшли далі загальних рекомендацій та постановки задач системних досліджень і не були зосереджені на проблемах екології та безпеки суспільства в мегаполісах [4], [7]. Сучасний розвиток методології прикладного системного аналізу (зокрема модифіковані методи морфологічного аналізу) відкриває нові перспективи для планування підземної інфраструктури великих міст [8], [9]. Адаптація цих методів до урбаністичних проблем [10], [11] 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.

Дослідження перспектив розвитку підземної урбаністики мегаполісів (зокрема Києва) та розкриття можливостей підземного простору взяти на себе функції найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об'єктів і комунікацій досліджувались в окремих працях [12], [13] та ін., де зокрема обґрунтовані можливості автомобільних тунелів суттєво зменшити шкідливі викиди в атмосферу середмістя. Ці роботи потребують подальшого розвитку методології з системних позицій.

**Постановка завдання** - метою роботи є розробка морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст (зокрема протяжних автомобільних тунелів) для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

В дослідженні застосовувався метод морфологічного аналізу [14], що є потужним інструментом оцінювання складних об'єктів і систем з великим набором взаємопов'язаних характеристик, в тому числі якісних. В основі методу лежить експертне оцінювання, яке на етапі прийняття рішення часто є головним джерелом інформації щодо об'єкта.

Метод морфологічного аналізу доцільно застосовувати для об'єктів, яким притаманна суттєва невизначеність, що в повній мірі є актуальним для задачі оцінювання потенційної ділянки будівництва автомобільного тунелю.

З інженерно-геологічної точки зору тунель є протяжним об'єктом, що може проходити через суттєво різні ділянки геологічного середовища. Крім того, точна оцінка всіх факторів впливу потребує суттєвих затрат часу і ресурсів, пов'язаних з проведенням інженерних і геологічних робіт і вимірювань, що не завжди є економічно доцільним на стадії прийняття рішення.

Зі структурно-функціональної точки зору потенційне будівництво тунелю впливає на досить велику частину міського простору, яка суттєво виходить за межі власне ділянки над трасою тунелю. У межах цього простору структурно-функціональні характеристики можуть значно відрізнятися, причому в їх оцінюванні присутній суб'єктивізм, пов'язаний як з якісною природою більшості з цих характеристик, так і з визначенням меж території, на яку вплине потенційне будівництво тунелю.

Метод морфологічного аналізу дозволяє певною мірою подолати різноманітність і суб'єктивізм за рахунок використання незалежних оцінок окремих альтернатив кожного з параметрів, і проведення перерахунку оцінок альтернатив з використанням матриці взаємозв'язків, що коригує початкові грубі оцінки шляхом урахування впливу інших характеристик об'єкта.

Задачу побудови морфологічних таблиць для проведення модифікованого методу морфологічного аналізу (МММА) з метою прийняття рішення щодо потенційної ділянки (траси) будівництва автомобільного тунелю було вирішено розбити на два завдання, які б враховували впливи факторів геологічного середовища та структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз. Для кожної з них застосовувався двоетапний модифікований морфологічний аналіз [15].

**Перше завдання** стосувалось врахування геологічного середовища по трасі тунелю. За основу було взято попереднє дослідження [16], де була побудована модель оцінювання ділянок для підземного будівництва паркінгів. На відміну від відносно невеликих ділянок будівництва паркінгів, що локалізуються переважно в умовах однотипного геологічного середовища, тунелі мають значну протяжність (тисячі метрів) і можуть знаходитись у різних інженерно-геологічних та морфологічних умовах (мати змінні альтернативи параметрів впливу). Для коректного відображення цієї ситуації була запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю шляхом внесення експертом в опитувальні форми для кожної альтернативи такої оцінки, що відповідає протяжності ділянки з альтернативним параметром, віднесений до всієї довжини тунелю: однозначно ні – 0; переважно ні – від 0 до 0,25; скоріш ні, ніж так від 0,25 до 0,5; і так і ні в рівній мірі – 0,5; скоріше так ніж ні – від 0,5 до 0,75; переважно так – від 0,75 до 1; однозначно так – 1. Таким чином, кожна альтернатива параметру отримує свою оцінку у відповідності до імовірності реалізації по довжині тунелю. У випадку коли загрозові альтернативи факторів зосереджуються на відносно невеликій ділянці тунелю, а ситуація на інших його ділянках значно відрізняється від найбільш несприятливої частини, треба окремо оцінювати весь тунель і найбільш ризиковану ділянку. Крім того, оскільки протяжна траса тунелю може потрапити в зону пливуну, який різко погіршує сприятливість ділянки підземному будівництву, ця важлива альтернатива була особливим чином врахована в морфологічній таблиці параметрів і досліджена в роботі.

На першому етапі для опису геологічного середовища використовувалася морфологічна таблиця з 10 параметрами, представлена в табл. 1. На основі оцінювання цієї таблиці розраховувались ваги елементів рішення. Морфологічна таблиця для елементів рішення (табл. 2) була дещо адаптована порівняно із попереднім дослідженням: залишені тільки ті фактори ризику (параметр D), які пов'язані з інженерно-геологічними процесами, решта факторів ризику перейшли до другого завдання; крім того, модифіковані альтернативи рекомендованих масштабів і глибини підземного будівництва (параметри B, C) наведені з урахуванням того, що підземне будівництво стосується конкретного класу об'єктів (тунелі). Для параметра F (рівень

## Геобудівництво

ризик) розмір збитку враховується, як вартість будівництва тунелю  $Q$ , помножена на співвідношення довжини найбільш несприятливої ділянки  $W$ . Остаточний вигляд адаптованої морфологічної таблиці наведено в табл. 2.

**Таблиця 1 – Морфологічна таблиця інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва тунелю**

Параметр	Альтернативи параметра
1. Рівень динамічного навантаження	1.1. Низький (46 – 53 дБ)
	1.2. Середній (53 – 73 дБ)
	1.3. Підвищений (73 – 96 дБ)
	1.4. Високий (більше 96 дБ)
2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови	2.1. Незначний ( $K_{ch} < 1$ )
	2.2. Помірний ( $1 < K_{ch} < 2$ )
	2.3. Відносно високий ( $2 < K_{ch} < 3,5$ )
	2.4. Високий ( $K_{ch} > 3,5$ )
3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву	3.1. Незначний ( $K_{mac} < 0,05$ , МПа)
	3.2. Помірний ( $0,05 < K_{mac} < 0,3$ , МПа)
	3.3. Високий ( $0,3 < K_{mac} < 0,5$ , МПа)
	3.4. Вельми високий ( $K_{mac} > 0,5$ , МПа)
4. Вплив існуючих підземних об'єктів	4.1. Відсутній (відстань понад 50 м)
	4.2. Незначний (відстань 20 – 50 м)
	4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)
	4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	5.1. Невивітрілі глини та піски середньої щільності
	5.2. Техногенні відклади (намівні та насипні ущільнені різновиди)
	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)
6. Розрахунковий опір ґрунту	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи $> 300$ кПа
	6.2. Міцні 200-300 кПа
	6.3. ґрунти середньої міцності 150-200 кПа
	6.4. Відносно міцні ґрунти $< 150$ кПа
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	7.1. Водоносні горизонти у Р- $N_{1пр}$
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод $> 3$ м, напірних $> 10$ м
	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод $< 3$ м, напірних $< 10$ м
	7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до $1^\circ$ )
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні $1-4^\circ$ , щільність розчленованості рельєфу $0-2$ км/км <sup>2</sup> )
	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні $4-8^\circ$ , щільність розчленованості рельєфу $2-3$ км/км <sup>2</sup> )
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні $> 8^\circ$ , щільність розчленованості рельєфу $3-4$ км/км <sup>2</sup> )
9. Інженерно-геологічні процеси	9.1. Відсутні
	9.2. Процеси застабілізовані
	9.3. Прояв зсувних зміщень незначних об'ємів
	9.4. Активний прояв просідання, підтоплення, гравітаційних процесів
10. Геотехнології будівництва підземних споруд	10.1. Відкриті
	10.2. Підземні

**Таблиця 2 – Морфологічна таблиця елементів рішення щодо ділянки будівництва тунелю**

Параметр	Альтернатива
А. Придатність ділянки	А.1. Придатна
	А.2. Непридатна
В. Масштаб об'єкта	В.1. Площа перерізу до 10 м <sup>2</sup>
	В.2. Площа перерізу до 25 м <sup>2</sup>
	В.3. Площа перерізу до 40 м <sup>2</sup>
	В.4. Площа перерізу понад 40 м <sup>2</sup>
С. Рівень забудови	С.1. 0–10 м
	С.2. 10–20 м
	С.3. 20–60 м
	С.4. глибше 60 м
D. Фактор ризику	D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності
	D.2. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд
	D.3. небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти
	D.4. Ініціація зсувних явищ та інших інженерно-геологічних процесів
E. Ступінь ризику	E.1. <3%
	E.2. 3–10%
	E.3. 10–20%
	E.4. 20–50%
	E.5. >50%
F. Рівень ризику	F.1. 0,1–5% QW
	F.2. 5–20% QW
	F.3. 20–50% QW
	F.4. >50% QW

Враховуючи, що в новому дослідженні аналізуються придатність ділянки саме для протяжних тунелів, особливу увагу було приділено параметру 7 з табл. 1, зокрема його альтернативі 7.4 (Наявні підтоплення та/або пливуні). Були оцінені зв'язки з цією альтернативою, оскільки у випадку будівництва тунелів висока ймовірність цієї альтернативи різко підвищує ризики, пов'язані з будівництвом і суттєво знижує привабливість ділянки.

Для тестування цих змін було взято одну з ділянок попереднього дослідження [16], і в ній штучно внесено підвищення ймовірності пливуні. Решта оцінок альтернатив залишились незмінними. В табл. 3 показано, як зміни в матриці взаємозв'язків вплинули на результат, зокрема для альтернативи «А. Придатність ділянки».



Таблиця 3 – Експеримент зі штучним підвищенням ймовірності альтернативи «Наявні підтоплення та/або пливуні»

Низька ймовірність пливуну (безпечна ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні»	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,8; 0,2; 0,2}	A.1. Придатна	0,993	A.1. Придатна	0,898
	A.2. Непридатна	0,007	A.2. Непридатна	0,102
Підвищена ймовірність пливуну (ризикована ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні»	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,5; 0,5; 0,5}	A.1. Придатна	0,987	A.1. Придатна	0,768
	A.2. Непридатна	0,013	A.2. Непридатна	0,232
Висока ймовірність пливуну (небезпечна ділянка)				
Оцінки параметра «7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні»	Стара модель		Нова модель	
{0,2; 0,2; 0,2; 0,8}	A.1. Придатна	0,981	A.1. Придатна	0,498
	A.2. Непридатна	0,019	A.2. Непридатна	0,502

З таблиці 3 видно, що нова модель, на відміну від старої, більш адекватно реагує на збільшення ймовірності пливуну в геологічному середовищі, істотно зменшуючи вагу альтернативи «А.1. Придатна» навіть для дуже сприятливої з точки зору всіх інших альтернатив ділянки. Тут також потрібно зазначити, що через те, що зміни в параметрі 7 були штучними, виникла певна невідповідність між цим параметром і іншими, тому на першому етапі ММА модель намагалась «виправити» штучні збурення, частково нівелюючи їх. Незважаючи на це, експеримент явно показує більшу відповідність нової моделі поставленій задачі.

Друге завдання стосувалось врахування структурно-функціональних характеристик території, в районі якої проходить тунель. Метою цього завдання було визначення доцільності побудови тунелю, а також різнотипних ризиків, які є актуальними для цієї території, з огляду на забудову, характерну для цієї території, дорожню мережу, характеристики руху транспорту в районі потенційного тунелю.

Серед ризиків, які найбільш доцільно розглядати, можна сформувати чітку 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, лязгання 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 морфологічних таблиць для завдання аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою МММА.

Побудована морфологічна таблиця 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 віденсти 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 розглянутих 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.

Морфологічна таблиця з вищезазначеними параметрами і їх альтернативами наведена в табл. 4.

**Таблиця 4 – Морфологічна таблиця параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори**

<b>Параметр</b>	<b>Альтернативи параметра</b>
1. Тип забудови в районі потенційного тунелю	1.1. Житлова забудова
	1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова
	1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти
	1.4. Парки, зони відпочинку
	1.5. Промислова забудова
	1.6. Незабудовані території
2. Щільність житлової забудови	2.1. Дуже низька
	2.2. Низька
	2.3. Середня
	2.4. Висока
3. Фактор середмістя	3.1. Ділянка розташована в зоні середмістя
	3.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті
	3.3. Ділянка поза середмістям (без впливу на нього)
4. Залюдненість в районі існуючої траси і потенційного тунелю	4.1. Дуже низька
	4.2. Низька
	4.3. Середня
	4.4. Висока
5. Інтенсивність автомобільного руху в районі потенційного тунелю	5.1. Низька
	5.2. Середня
	5.3. Висока
	5.4. Дуже висока
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю	6.1. до 15 км/год
	6.2. 15-30 км/год
	6.3. 30-60 км/год
7. Наземна зв'язаність кінців тунелю автошляхами	7.1. Дуже погана (немає відносно прямих шляхів, значний об'їзний рух з певними недоліками, )
	7.2. Погана (між кінцями тунелю є лише один шлях, який має певні недоліки)
	7.3. Середня (між кінцями тунелю є один магістральний шлях або декілька альтернативних шляхів з недоліками)
	7.4. Добра (між кінцями тунелю є більше одного магістрального шляху)
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю	8.1. Погана (вузькі дороги, багато перехресть, особливо нерегульованих, захаращеність шляхів)
	8.2. Середня (є перехрестя, але в основному регульовані)
	8.3. Висока (магістралі, мало перехресть, вони регульовані)

Очевидно, ці параметри є взаємопов'язаними, тому в дослідженні пропонується використати повноцінну двоетапну процедуру МММА, з перерахунком оцінок також і на першому етапі дослідження для урахування взаємозв'язків між параметрами.



Наявність або відсутність взаємозв'язків для параметрів таблиці 4 оцінена матрицею, наведеною в табл. 5, де позначка «+» означає наявність взаємозв'язків між хоча б однією парою відповідних параметрів, «-» означає відсутність таких зв'язків.

**Таблиця 5 – Матриця наявності або відсутності взаємозв'язків між параметрами табл. 4**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		+	+	+	+	-	-	-
2	+		+	+	+	-	-	-
3	+	+		-	+	+	+	+
4	+	+	-		-	-	-	-
5	+	+	+	-		+	+	-
6	-	-	+	-	+		+	+
7	-	-	+	-	+	+		-
8	-	-	+	-	-	+	-	

Для другого етапу МММА побудована морфологічна таблиця, 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.

Ризики розглядались у двох аспектах:

1) Вагомість кожної із зазначених вище груп факторів ризику P1–P4. В даному випадку аналізується, наскільки той чи інший фактор ризику є важливим для конкретної території – наприклад, чим більше щільність населення, тим вагомішим є фактор забруднення повітря; чим більше інтенсивність руху, тим важливішим є фактор наявності чи відсутності заторів і т. д.

2) Здатність побудованого тунелю вплинути на мінімізацію відповідних факторів ризику. Аналізується, наскільки для даної території тунель зможе посприяти запобіганню або зменшенню відповідного фактору ризику. Значною мірою, це залежить від інтенсивності руху, однак для деяких факторів ризику можна встановити залежності і з іншими параметрами з табл. 4.

Два цих аспекти певною мірою корелюють, однак іноді є суттєві відмінності, які вимагають їх розгляду за допомогою різних параметрів. Наприклад, для великої щільності населення (залюдненості району) фактор забруднення повітря має суттєву вагу, однак здатність тунелю вплинути на цей фактор залежить не від щільності населення, а від зміни інтенсивності автомобільного руху (переведення його значною мірою на підземний рівень). Тому 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. Параметри для морфологічної таблиці другого етапу МММА зведені в табл. 6.

**Таблиця 6 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних і екологічно-безпекових факторів будівництва тунелю**

Параметр	Альтернатива
А. Доцільність тунелю	А.1. Доцільний
	А.2. Недоцільний
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.1. Забруднення повітря
	В.2. Шум і динамічні впливи
	В.3. Дорожні затори
	В.4. Дорожні аварії
С. Вплив побудови тунелю на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає
	С.2. Частково мінімізує
	С.3. Помірно мінімізує
	С.4. Суттєво мінімізує
D. Вплив побудови тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»	D.1. Не впливає
	D.2. Частково мінімізує
	D.3. Помірно мінімізує
	D.4. Суттєво мінімізує
Е. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні затори»	Е.1. Не впливає
	Е.2. Частково мінімізує
	Е.3. Помірно мінімізує
	Е.4. Суттєво мінімізує
F. Вплив побудови тунелю на фактор «Дорожні аварії»	F.1. Не впливає
	F.2. Частково мінімізує
	F.3. Помірно мінімізує
	F.4. Суттєво мінімізує

Між параметрами морфологічних таблиць, представлених в табл. 4 і табл. 6 є зв'язки, що описують вплив морфологічної таблиці першого етапу на морфологічну таблицю другого етапу. Наявність або відсутність таких зв'язків представлена в табл. 7.

**Таблиця 7 – Матриця наявності або відсутності впливу параметрів табл. 4 на параметри табл. 6**

	A	B	C	D	E	F
1	–	+	–	–	–	–
2	–	+	–	–	–	–
3	+	+	–	–	–	–
4	+	+	–	–	+	+
5	+	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+	+
7	+	+	–	–	+	–
8	+	+	–	–	+	+

Аналіз зв'язків і взаємозв'язків між параметрами (табл. 5, 7) дає змогу зменшити навантаження на експертів за рахунок виключення з опитувальних форм питань щодо пар альтернатив, між якими, очевидно, відсутні безпосередні відношення. Таким

чином, для побудови морфологічної моделі потрібно близько 200 і 400 питань для першого і другого етапів відповідно.

### ВИСНОВКИ.

Розроблена морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст (зокрема протяжних підземних споруд транспортного призначення) для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору, яка відкриває можливості для системного аналізу транспортної інфраструктури мегаполісу і оцінки доцільності передачі частини транспортних функцій автомобільним тунелям на територіях запланованих трас. Побудовані морфологічні таблиці інженерно-геологічних факторів ділянки будівництва тунелю, елементів рішення щодо траси тунелю, параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори та матриця взаємозв'язків між цими параметрами. Запропонована методика врахування змінності альтернатив параметрів вздовж траси тунелю для формування експертних оцінок. Визначено ступінь впливу фактору «Наявні підтоплення та/або пливуні» на зміну сприятливості ділянки (траси тунелю) підземному будівництву.

### 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.
- [5] G. E. Golubev, *Underground urbanistics and city*. Moscow: MIKHiS, 2005.
- [6] H. I. Haiko, "A complex of priority tasks for systemic development of underground urbanistics", in *International scientific-technical conference "Miners forum 2019"*, Dnipro, NTU "Dniprovskia politekhnika", pp. 171–175, 2019.
- [7] B. A. Kartosiya, "Developing underground space of large cities. New tendencies", *Mining information-analytical bulletin*, no. 1, pp. 615–629, 2015.
- [8] N. D. Pankratova, *System analysis. Theory and applications*. Kyiv: Naukova Dumka, 2018.
- [9] N. D. Pankratova, and I. O. Savchenko, *Morphological analysis. Problems, theory, applications*. Kyiv: Naukova Dumka, 2015.
- [10] N. D. Pankratova, I. O. Savchenko, H. I. Haiko, and V. H. Kravets, "System approach to mastering underground space of metropolises under conditions of uncertainty and multi-factor risks", *Reports of National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 10, pp. 18–25, 2018. doi:10.15407/dopovidi2018.10.018.
- [11] H. I. Haiko, I. O. Matviichuk, V. S. Biletsky, and P. Saluha, "Methods of forecasting favorability estimate of geological environment for construction of underground urban objects", *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series: Geology. Geography. Ecology*, no. 48, pp. 39–51, 2018. doi:10.26565/2410-7360-2018-48-03.

[12] H. I. Haiko, and P. V. Zakharchenko, "Prospects of tunnel passages construction under the Dnieper", *Underwater technologies*, no. 4, pp. 72–79, 2016.

[13] H. I. Haiko, V. P. Bulhakov, and M. O. Siveryn, "Construction of a system of road tunnels as a way to solve transport and environmental challenges of a metropolis", *Visnyk of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute", "Mining" series*, no. 30, pp. 196–206, 2016. doi:10.20535/2079-5688.2016.30.67236.

[14] G. Duczynski, "Morphological analysis as an aid to organisational design and transformation", *Futures*, vol. 86, pp. 36–43, 2017. doi:10.1016/j.futures.

[15] I. O. Savchenko, "Estimating the solution sensitivity in application of the modified morphological analysis method", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 52, no. 5, pp. 782–790, 2016. doi:10.1007/s10559-016-9879-1.

[16.] 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. doi:10.29202/nvngu/2019-3/14.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2020.