

УДК 624.19+ 303.732.4

Гайко Геннадій Іванович, д.т.н., професор
кафедра геоінженерії ІЕЕ
Савченко Ілля Олександрович
науково-дослідний відділ математичних
методів системного аналізу ІПСА

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ ВЕЛИКИХ МІСТ¹

Проведена формалізація структурно-функціональних, інженерно-геологічних і техногенних факторів освоєння підземного простору та застосування їх у системній методиці мінімізації екологічних і техногенних ризиків великих міст, зокрема для обґрунтування передачі функцій найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об'єктів і комунікацій підземним спорудам та вибору раціональних трас і місць локалізації автомобільних тунелів. Показано інструменти, що формалізують планування і супроводжують освоєння міського підземного простору на базі системної методології мультидисциплінарного характеру (екологія, техногенна безпека, підземне будівництво, транспорт, міське територіальне планування, прикладний системний аналіз та ін.). Розроблено систему морфологічних таблиць, які враховують впливи факторів геологічного середовища та структурно-функціональних характеристик території з ризиками екологічних та техногенних загроз.

Ключові слова: підземна урбаністика, екологія міста, інфраструктура, ризики, автомобільні тунелі, морфологічний аналіз, ділянки будівництва.

The formalization is performed for structural-functional, geological engineering and technogenic factors of mastering urban space. They are incorporated in system methodology of minimizing ecological and technogenic risks of large cities, particularly for transferring the functions of the most dangerous and risk-bearing surface objects and communications to underground facilities, and selecting the rational tracks and localizations of car tunnels. The tools for formalization and support of mastering underground city space on the basis of multi-disciplinary system methodology (ecology, technogenic safety, transport, urban territory planning, applied system analysis etc.). The system of morphological tables is developed that takes into account the influence of geological environment factors and structural-functional site properties with risks of ecological and technogenic threats.

Key words: underground urban construction, city ecology, infrastructure, risks, car tunnels, morphological analysis, construction sites.

Вступ. 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

¹ Робота виконана в рамках проекту Національного 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»

екологічних організацій [2-4]. 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 [5, 6]. Складні проблеми, які супроводжують використання підземного простору великих міст, можна віднести до слабкоструктурованих проблем, підходи до вирішення яких доцільно ґрунтувати на системній методології [7, 8]. Потужним інструментом оцінювання складних об'єктів і систем з великим набором взаємопов'язаних характеристик, в тому числі якісних, яким притаманна суттєва невизначеність є Метод модифікованого морфологічного аналізу (МММА), який отримав застосування для оцінки перспектив розвитку підземної урбаністики мегаполісів [9, 10] і може бути застосований для мінімізації екологічних і техногенних ризиків при плануванні урбаністичного простору [11].

Мета роботи. Полягає в розробці методики оцінки впливів протяжних підземних споруд транспортного призначення (зокрема, автомобільних тунелів) на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору.

Матеріал і результати досліджень. Науковим методом досліджень прийнято двоетапну процедуру модифікованого морфологічного аналізу (МММА), яка дозволила поєднати фактори впливу геологічного середовища та технологій спорудження підземних об'єктів зі структурно-функціональними характеристиками території будівництва автомобільних тунелів. За проектом Генерального плану розвитку Києва до 2025 року має бути побудовано вісім, автомобільних тунелів (три з них пройдуть під Дніпром), причому тунелі, крім вирішення гострих транспортних проблем, здатні різко знизити кількість вихлопних газів у середмісті, оскільки вихлопні гази з тунелю можна відвести та/або утилізувати (очистити) [12].

На першому етапі для опису геологічного середовища використовувалася морфологічна таблиця з параметрами, представленими в табл. 1. В даному дослідженні були виділені десять параметрів для його опису: 1) рівень динамічного навантаження; 2) показник статичного навантаження від поверхневої забудови; 3) показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву; 4) вплив існуючих підземних об'єктів; 5) генетичний тип та літологічний склад ґрунтів; 6) розрахунковий опір ґрунту; 7) вплив пливунів, водоносних горизонтів і верховодки; 8) тип рельєфу і морфометрія; 9) інженерно-геологічні процеси; 10) геотехнології будівництва підземних споруд.

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)

Параметр	Альтернативи параметра
5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів	4.3 Впливовий (відстань 10 – 20 м)
	4.4 Загрозливий (відстань ближче 10 м)
	5.1. Невивітрілі глини та піски середньої щільності
	5.2. Техногенні відклади (намівні та насипні ущільнені різновиди)
6. Розрахунковий опір ґрунту	5.3. Делювіальні глинисті ґрунти (водонасичені), обводнені надзаплавні піски
	5.4. Просідні ґрунти, ґрунти з особливими властивостями (лес, торф, мул)
	6.1. Дуже міцні ґрунтові основи >300 кПа
	6.2. Міцні 200-300 кПа
7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки	6.3. ґрунти середньої міцності 150-200 кПа
	6.4. Відносно міцні ґрунти <150 кПа
	7.1. Водоносні горизонти у Р-N _{1np}
	7.2. Глибина залягання ґрунтових вод > 3 м, напірних > 10 м
8. Тип рельєфу і морфометрія	7.3. Глибина залягання ґрунтових вод < 3 м, напірних < 10 м
	7.4. Наявні підтоплення та/або пливуні
	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до 1 °)
	8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні 1-4 °, щільність розчленованості рельєфу 0-2 км/км ²)
9. Інженерно-геологічні процеси	8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні 4-8 °, щільність розчленованості рельєфу 2-3 км/км ²)
	8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні >8 °, щільність розчленованості рельєфу 3-4 км/км ²)
	9.1. Відсутні
	9.2. Процеси застabilізовані
10. Геотехнології будівництва підземних споруд	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

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 розглядаються в рамках другого етапу; 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 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 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 ²
	В.2. Площа перерізу до 25 м ²
	В.3. Площа перерізу до 40 м ²
	В.4. Площа перерізу понад 40 м ²
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
Е. Ступінь ризику	Е.1. <3%
	Е.2. 3–10%
	Е.3. 10–20%
	Е.4. 20–50%
	Е.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

На другому етапі була обрана група ризиків, яка визначила побудову морфологічних таблиць для завдання аналізу структурно-функціональних характеристик території за допомогою МММА. 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 традиційному 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.

Побудована морфологічна таблиця другого етапу містить 8 параметрів, які є найбільш важливими для визначення доцільності тунелю і його впливу на мінімізацію різного роду екологічних та техногенних 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. Параметри впливу та їх альтернативи розміщені в морфологічній таблиці 3.

Таблиця 3 – Морфологічна таблиця параметрів впливу на структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори

Параметр	Альтернативи параметра
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)

Параметр	Альтернативи параметра
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, захащеність шляхів)
	8.2. Середня (є перехрестя, але в основному регульовані)
	8.3. Висока (магістралі, мало перехресть, вони регульовані)

Для імплементації розроблених процедур опрацювання експертних оцінок за розробленими морфологічними таблицями використовувалось програмне забезпечення SAS Studio, для якого були написані користувацькі модулі мовою C# у середовищі Microsoft Visual Studio 2017. Модулі відповідають окремим крокам МММА: побудова морфологічних таблиць; оцінювання морфологічних таблиць; оцінювання матриць взаємозв'язків; розрахунок ваг альтернатив параметрів для двоетапної процедури морфологічного аналізу. Така система дозволяє конструювати морфологічні дослідження для достатньо складних задач, включаючи розглянуту в цій роботі. Загальний вигляд взаємодії між модулями МММА для задачі оцінювання пріоритетності території для підземного будівництва наведено на рис. 1.

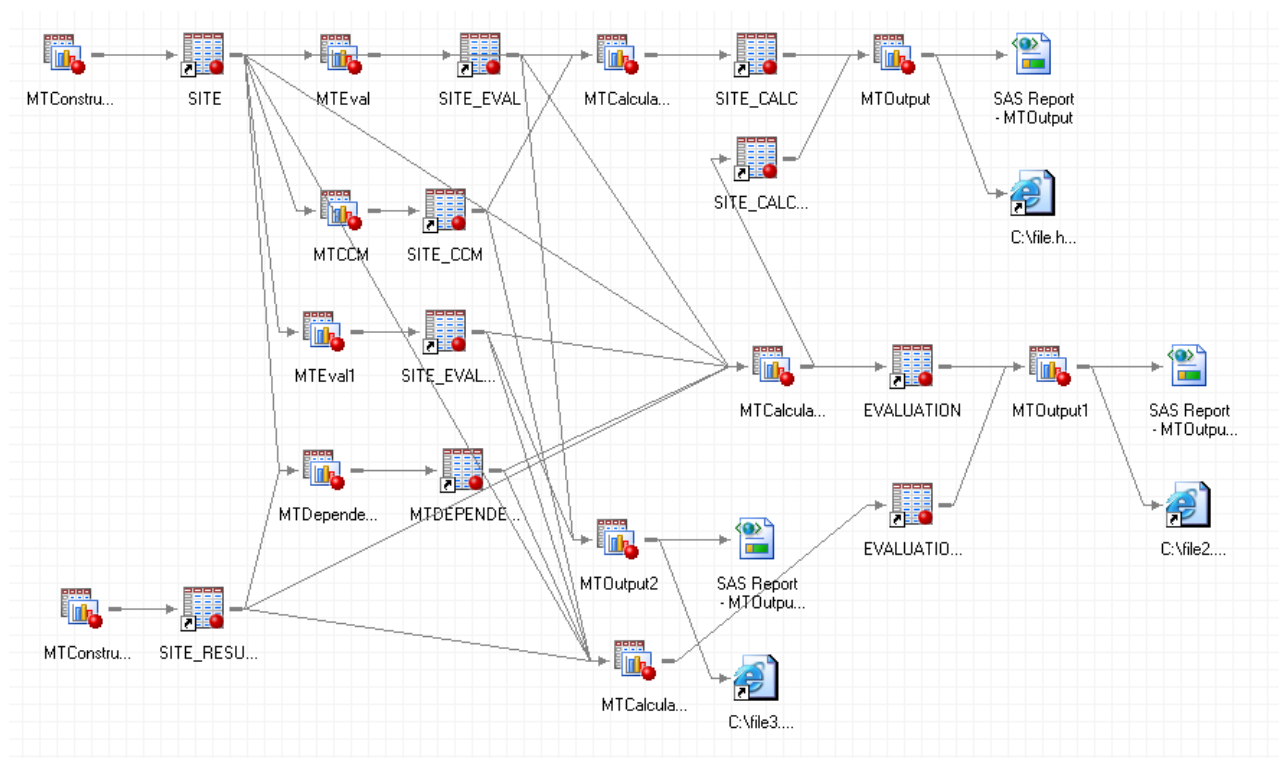


Рисунок 1 – Модель в SAS Studio для оцінювання пріоритетності території для підземного будівництва

Для користування моделлю достатньо ввести вхідні дані, отримані на основі опитувальних форм, по ділянці території, подальша процедура МММА виконується автоматично, надаючи необхідні результати по обох етапах методу.

Висновки. 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. Розроблена методика оцінки впливів протяжних підземних споруд транспортного призначення (зокрема, автомобільних тунелів) на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. 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. Вперше цільовою функцією морфологічної моделі розвитку підземної інфраструктури великих міст є мінімізація екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору. Розроблена морфологічна модель відкриває можливості для системного аналізу транспортної інфраструктури мегаполісу і оцінки доцільності передачі частини транспортних функцій автомобільним тунелям на територіях запланованих трас.

Література

1. World Urbanization Prospects 2018: Highlights. United Nations. New York, 2019.
2. Е. В. Корендясева, Экологические аспекты управления городом. М.: МГУУ

Правительства Москвы, 2017.

3. Елисеєв Д.О. Риски в современных мегаполисах: виды, особенности, специфика// Региональная экономика и управление. – №4 (52), 2017.
4. Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва за 2017 рік. – Київ: КМДА, 2018. – 128 с.
5. P. H. Gilbert et al., Underground Engineering for Sustainable Urban Development. Washington: The National Academies Press, 2013.
6. Голубев Г. Е. Подземная урбанистика и город. М.: МИКХиС, 2005.
7. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. System analysis: Theory and Applications. Springer. – 2007. – 475 p.
8. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування. – Київ: Наукова думка. – 2015. – 245 с.
9. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. – К.: Наукова думка, 2020. – 134 с.
10. Н. І. Naiko, 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.
11. Гайко Г.І., Савченко І.О., Вапнічна В.В. Морфологічна модель розвитку підземної інфраструктури великих міст для мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору// *Геоінженерія*. – 2020. – №4. – С. 7 – 18.
12. Гайко Г.І., Булгаков В.П., та Сіверин М.О. Система автомобільних тунелів як спосіб розв’язання транспортних і екологічних проблем мегаполісу// *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія «Гірництво»: Збірник наукових праць*, вип. 30, 2016. - С. 196–206.