

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.10.018>
УДК 519.876.2

**Н.Д. Панкратова, І.О. Савченко,
Г.І. Гайко, В.Г. Кравець**

НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”
E-mail: natalidmp@gmail.com, savil.ua@gmail.com, gayko.kpi@meta.ua, kravets@geobud.kiev.ua

Системний підхід до освоєння підземного простору мегаполісів в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків

Представлено членом-кореспондентом НАН України Н.Д. Панкратовою

Представлено системний підхід до освоєння підземного простору, що формалізує процес оцінки невизначеностей та багатофакторних ризиків і прийняття рішення про доцільність використання території (геологічного середовища) для міського підземного будівництва. Розроблено морфологічну модель оцінки ділянок будівництва підземних об'єктів, створено морфологічні таблиці, обґрунтовано альтернативи станів і шкали експертних оцінок, побудовано матриці взаємозв'язків факторів впливу та альтернатив параметрів.

Ключові слова: міське підземне будівництво, геологічне середовище, оцінка ризиків, прийняття рішень, метод морфологічного аналізу.

Значні можливості щодо вирішення проблем сучасних мегаполісів потребують розвитку підземної урбаністики, основаної на створенні масштабної інженерної інфраструктури шляхом розміщення в підземному просторі міста численних об'єктів транспортного, енергетичного, господарчого, комунального й соціального призначення. При цьому ефективно спланована й правильно експлуатована підземна інфраструктура підвищує якість життя, енергетичну ефективність і екологічну безпеку більшою мірою, ніж аналогічна система на поверхні. Підземна урбаністика, яка є невід'ємною складовою сучасного мегаполісу, вже вийшла за межі окремих локальних об'єктів і стає системним фактором розвитку міст [1]. Необхідність врахування ризиків різної природи, відповідної міської політики, планування та управління розвитком мегаполісів обумовлює необхідність спиратися на надійний науково-методичний фундамент, який базується на системному підході до освоєння підземного простору.

Підземні об'єкти зазвичай проектуються в умовах неповної інформації про геологічне середовище й техногенні впливи, оскільки піддаються дії великої кількості факторів. Точне встановлення їх параметрів і характеру взаємовпливів не є можливим на проектному етапі.

© Н.Д. Панкратова, І.О. Савченко, Г.І. Гайко, В.Г. Кравець, 2018

Таким чином, спостерігається невизначеність, для якої можуть бути встановлені різні категорії: просторова мінливість і геологічні фактори, помилки, що виникають при змінах і оцінках геомеханічних параметрів, включаючи їх статистичний розподіл, неповне врахування навантажень і упущення, що виникли в ході будівництва. Кожен підземний об'єкт має вартість будівництва, яка визначається спочатку його характеристиками та ринком, і корегується в ході будівництва фактичними інженерно-геологічними умовами. Тому повинні бути збалансовані витрати на докладне вивчення цих умов і запобігання ризикам або на ліквідацію їх наслідків. В іншому випадку необхідні витрати все одно будуть понесені або навіть перевищені з конфліктними наслідками для учасників будівництва [2].

Серед спроб дати науково-практичне забезпечення цим потребам зазначимо методику типізації геологічного середовища, яка враховує змінність властивостей не тільки поверхневого шару дослідної території (що є нагальною потребою для планування наземного будівництва), а й усієї товщі геологічного середовища [3]. Під типізацією геологічного середовища слід розуміти виділення таких його зон, які характеризуються різними умовами протікання геологічних і техногенних процесів і мають різну здатність реагувати на інженерно-господарське освоєння території, що розкривається специфікою взаємодії між геологічним середовищем і штучними елементами (спорудами). Перспективним є застосування методу Монте—Карло, який доповнює прийняті комп'ютерні моделі для більш точної оцінки імовірнісної природи факторів впливу при типізації міських територій для підземного будівництва [4]. Проте методика типізації потребує ретельних інженерно-геологічних досліджень виділених територій (свердловинні й геофізичні методи), фінансове забезпечення яких можливе лише при розробці конкретних проектів.

Натомість для інвесторів дуже важливо мати попередню (навіть загальну) інформацію щодо очікуваних ризиків будівництва на різних ділянках міського підземного простору. Ефективною методологією для цих задач в умовах складних систем із наявністю багатофакторних ризиків різної природи виступає системний аналіз. Застосування системного підходу знаходило різноманітні реалізації для планування поверхневої забудови великих міст, проте для підземної урбаністики не йшло далі загальної постановки завдань і аналізу методів досліджень [1, 5].

Перспективним для оцінки ризиків і ступеню придатності міських територій для освоєння підземного простору є застосування системного підходу в умовах невизначеностей та багатофакторних ризиків із залученням методу модифікованого морфологічного аналізу (МММА), який дозволяє оцінити ступінь (імовірність) і рівень ризику, тобто економічні втрати від реалізації несприятливих сценаріїв [6].

МММА передбачає залучення для оцінювання експертів, які можуть приймати рішення, базуючись на досвіді, інтуїції і відносно невеликій кількості наявної інформації про ділянку. Метою роботи є розробка системного підходу, що формалізує і супроводжує процес прийняття рішення щодо використання ділянки будівництва, зменшує вірогідність помилки через неврахування певних факторів або особливостей, надає інформацію для прийняття рішення у зручній формі таблиць, діаграм або графіків.

Побудова моделі в МММА має такі кроки:

визначення об'єктів (сутностей), яким відповідатимуть морфологічні таблиці, та зв'язків між ними;

Таблиця 1. Морфологічна таблиця для ділянки будівництва

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 (намивні 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 $R...N_{1пр}$ 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 підтоплені ділянки з РГВ до 1м
8. Тип рельєфу і морфометрія	8.1. Плaskі ділянки надзаплавних терас, моренно-льодовикові рівнини (нахил поверхні до 1°) 8.2. Слабко нахилені поверхні надзаплавних терас, ділянки вододілів (нахил поверхні $1...4^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $0...2$ км/км ²) 8.3. Долини малих річок, слабко розчленовані схили, висока заплава (нахил поверхні $4...8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $2...3$ км/км ²) 8.4. Зсувонебезпечні ділянки схилів з активним розвитком ярів, провалів, низька заплава (нахил поверхні $> 8^\circ$, щільність розчленованості рельєфу $3...4$ км/км ²)
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

побудова морфологічних таблиць (МТ) для кожного з об'єктів;
оцінювання залежностей між параметрами морфологічних таблиць.

Після цього модель вважається побудованою і може бути використана для розрахунку оцінок альтернатив параметрів конкретного об'єкта на основі введеної щодо нього експертної інформації.

Для даної задачі обрано двоетапну процедуру МММА, тобто використовуються дві МТ із причинним зв'язком між ними: перша описує земельну ділянку будівництва, друга — описує рішення щодо цієї території (геологічного середовища).

Для побудови МТ використовуємо класифікацію об'єкта за різними характеристиками, які є релевантними відносно прийняття рішення. Кожний розріз класифікації стає параметром МТ, а можливі значення або діапазони цього параметра — альтернативами цього параметра МТ. Потрібно зазначити, що таких параметрів може бути дуже велика кількість, що робить процедуру МММА занадто громіздкою для експертного оцінювання і розрахунку. Тому деякі множини характеристик, які приблизно однаково впливають на результат, агреговані у окремі параметри. Остаточний вигляд МТ наведено у табл. 1.

Стисло розглянемо обрані параметри, метою яких є відображення з максимальною об'єктивністю впливу геологічного середовища і техногенних факторів на ризики підземного будівництва та експлуатації підземних споруд. Параметри 1...4 та 6 характеризують загрози стійкості (надійності) підземної споруди й відображають впливи на неї динамічного навантаження (автомобільні траси, залізниця, метрополітен, промислові підприємства тощо); статичного навантаження поверхневої забудови з урахуванням щільності та висотності будівель; навантаження від гірського тиску порід чи ґрунтів на оправу споруди; геомеханічного збурення масиву близькістю інших підземних споруд та опірність ґрунту навантаженням. Параметри 5, 7...9 характеризують властивості та процеси геологічного середовища, які значною мірою впливають на вартість і швидкість спорудження виробок, умови безремонтної експлуатації підземних споруд та екологічну безпеку. Автори усвідомлюють можливі взаємовпливи прийнятих факторів в окремих позиціях, проте обидві групи факторів є конче необхідними для аналізу й будуть однаковою чином стосуватись усіх досліджуваних територій (ділянок будівництва). Прийняті діапазони факторів відповідають чотирьом альтернативам сприятливості геологічного середовища освоєнню підземного простору: вельми сприятливе, сприятливе, недостатньо сприятливе та несприятливе.

До другої МТ увійшли параметри рішення, яке доцільно приймати для ділянки, що розглядається. Усього обрано 6 параметрів (табл. 2).

До загальних характеристик віднесено параметри А, В, С. Параметр А (придатність ділянки) є інтегруючим, причому альтернатива А.1 (придатність ділянки) охоплює вельми сприятливе, сприятливе та недостатньо сприятливе геологічне середовище, а альтернатива А.2 (непридатність ділянки) — несприятливе середовище, пов'язане з високими значеннями факторів ризику (див. параметри D – F). Параметр В (масштаб об'єкта) характеризує типи підземних споруд, що проектуються, і відображує підземні об'єкти інженерної інфраструктури міста, між іншим — каналізаційні колектори (альтернатива В.1), транспортні комунікації (альтернатива В.2), багатофункціональні підземні споруди камерного типу (альтернатива В.3) та камери великих перерізів: підземні торгівельні комплекси, спортивні об'єкти, електростанції, виробничі підприємства тощо (альтернатива В.4). Оскільки в різних геоло-

гічних середовищах ступінь сприятливості підземному будівництву значною мірою залежить від масштабу підземної споруди, то для прийняття рішення щодо вибору об'єкта будівництва важливо враховувати альтернативи В. Глибина забудови (параметр С) пов'язана з функціональним призначенням споруди та прийнятою геобудівельною технологією і впливає на формування навантаження на кріплення (оправу) від гірського тиску, статичних і динамічних навантажень.

До ризиків підземного будівництва віднесені параметри D, E, F. Серед альтернатив факторів ризику виділено руйнування конструкцій і порушення функціональності та безпеки споруд (D.1), небезпечний вплив нових виробок на наземні та підземні об'єкти (D.2), ініціація зсувних явищ похилого рельєфу (D.3), підтоплення (D.4), екологічні ризики (D.5), транспортні проблеми (D.6), а також зростання вартості будівництва та експлуатації споруд (D.7). Ступінь ризику (параметр E) вказує на імовірність реалізації небажаних подій (D.1... D.7), а рівень ризику (параметр F) оцінює економічні втрати від реалізації небажаних подій у відсотках від початкової вартості споруди Q.

Після визначення параметрів і альтернатив МТ встановлюється сила зв'язку між альтернативами різних параметрів, якщо такий зв'язок є присутнім. Розрізняють зв'язки двох типів: взаємозалежність альтернатив (для параметрів однієї МТ) і вплив однієї альтернативи на іншу (для параметрів із двох різних МТ). Зв'язки оцінювались за допомогою процедур експертного оцінювання для МММА, описаних в [6].

Вважається, що експерт при оцінюванні об'єкта дає незалежне значення для ймовірності альтернативи параметра, яке не враховує вплив інших альтернатив. Однак альтернативи

Таблиця 2. Морфологічна таблиця рішення щодо ділянки будівництва

Загальна характеристика		
А. Придатність ділянки	В. Масштаб об'єкту	С. Глибина забудови
A.1. Придатна A.2. Непридатна	V.1. Площа перерізу до 10 м ² V.2. Площа перерізу до 35 м ² V.3. Площа перерізу до 70 м ² V.4. Площа перерізу до і більше 70 м ²	C.1. 0...10 м C.2. 10...20 м C.3. 20...50 м C.4. глибше 50 м
Ризики для забудови		
D. Фактор ризику	E. Ступінь ризику	F. Рівень ризику
D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності та безпеки підземних споруд D.2. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти D.3. Ініціація зсувних явищ D.4. Підтоплення D.5. Екологічні ризики D.6. Транспортні проблеми D.7. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд	E.1. <3 % E.2. 3...10 % E.3. 10...20 % E.4. 20...50 % E.5. >50 %	F.1. 0,1...5 % Q F.2. 5...20 % Q F.3. 20...50 % Q F.4. >50 % Q

можуть бути певним чином пов'язані і тоді такі комбінації альтернатив будуть більш або менш ймовірними при розгляді конфігурацій об'єкта в цілому. У відповідності до процедур МММА оцінка сили взаємозв'язку $c_{i_1 j_1 i_2 j_2} \in [-1; 1]$, де значення “-1” означає несумісність альтернатив $a_{j_1}^{(i_1)}$ і $a_{j_2}^{(i_2)}$, “0” – незалежність цих альтернатив, “1” – їх взаємопов'язаність. Проміжні значення означають часткове збільшення або зменшення ймовірності потрапляння обох альтернатив в одну конфігурацію.

Варто зазначити, що не всі параметри МТ прямо впливають один на одного. Питання щодо тих параметрів, між якими очевидно відсутній зв'язок, не ставилися для зменшення навантаження на експерта.

Маючи оцінену матрицю взаємозв'язків для морфологічної таблиці і вхідні дані у вигляді оцінок незалежної ймовірності альтернатив МТ від експерта, можна оцінити як ймовірності альтернатив з урахуванням взаємозв'язків між ними, так і ймовірності всіх можливих конфігурацій МТ першого етапу, і таким чином отримати формалізований опис ділянки у вигляді вірогідності реалізації рівнів кожного з факторів.

Далі було оцінено вплив параметрів МТ першого етапу (див. табл. 1) на параметри МТ другого етапу (див. табл. 2). Аналогічно до побудови матриці взаємозв'язків, при оцінюванні цього впливу використовувалась оцінка $c_{i_1 j_1 i_2 j_2} \in [-1; 1]$, де значення “-1” означає неможливість вибору або неефективність альтернативи $a_{j_2}^{(i_2)}$ МТ другого етапу при появі альтернативи $a_{j_1}^{(i_1)}$ МТ першого етапу, “0” – незалежність оцінки $a_{j_2}^{(i_2)}$ від появи $a_{j_1}^{(i_1)}$, “1” – гарантованість вибору або найбільшу ефективність $a_{j_2}^{(i_2)}$ при появі $a_{j_1}^{(i_1)}$. Відповіді були отримані за допомогою опитувальних форм, переведені у числову форму і занесені в матрицю зв'язків.

Використовуючи ймовірності конфігурацій МТ першого етапу, обчислені на попередньому кроці, і оцінки сили зв'язку між альтернативами МТ першого і другого етапів, розраховуються оцінки альтернатив МТ другого етапу (див. табл. 2). Ці оцінки містять інформацію про ваги відповідних альтернатив параметрів рішення щодо ділянки, в тому числі ризиків, пов'язаних із будівництвом. При цьому враховується невизначеність інформації щодо самої ділянки, оскільки розглядаються всі можливі її конфігурації із відповідними ймовірностями.

За допомогою створеної моделі, використовуючи двоетапну процедуру МММА, можна оцінювати ризики для різних ділянок підземного будівництва. Вхідними даними для такої задачі є експертна думка щодо ймовірностей альтернатив першої МТ (див. табл. 1), тобто характеристик ділянки. Способи отримання цієї інформації від експерта описані в [6]. Загалом, процедура розрахунку ваг кожної з альтернатив МТ другого етапу складається з таких основних кроків:

- отримання інформації від експерта за допомогою опитувальної форми;
- переведення відповідей експерта у числову форму і розрахунок оцінок альтернатив першої МТ з урахуванням взаємозалежностей між ними;
- розрахунок оцінок другої МТ на основі множини можливих конфігурацій першої МТ і матриці зв'язків.

Таким чином, основою системного підходу до освоєння підземного простору, аналізу ризиків ділянок міського підземного будівництва обрано модифікований метод морфологічного аналізу, який добре зарекомендував себе у моделюванні проблем, об'єкти яких мо-

жуть мати велику кількість альтернативних конфігурацій за рахунок комбінування різних значень параметрів. Він дозволяє, спираючись на виділені групи геологічних і техногенних факторів, розглянути низку рішень і груп ризиків для оцінки доцільності розвитку підземної урбаністики на розглянутих ділянках. Застосована методика вперше дозволяє оцінити різноманітні типи ризиків, імовірність реалізації негативних сценаріїв та додаткові витрати, з ними пов'язані, ще на передпроектній стадії спорудження підземних об'єктів. Це дає в руки інвесторів та міських державних адміністрацій ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при освоєнні підземного простору мегаполісів.

Представлені результати отримані в рамках науково-дослідного проекту МОН України № 0117U002414 "Розвиток підземної урбаністики як системи освоєння георесурсів великих міст".

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Pankratova Natalya D., Gayko Gennadiy I., Kravets Victor G., Savchenko Ilya A. Problems of Megapolises Underground Space System Planning. *J. Automation and Information Sciences*. 2016. 48. Iss. 4. P. 32–38. doi: <http://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.40>
2. Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А. Геотехнические риски подземного строительства. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 362 с.
3. Гайко Г.І., Кріль Г.І. Типізація геологічного середовища урбанізованих територій при освоєнні підземного простору. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (Пуща-Водиця, 5–9 жовтня 2015 р.). Київ: Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, 2015. С. 173–180.
4. Гайко Г.І., Матвійчук І.О. Постановка імовірнісної задачі оцінки факторів впливу на міські підземні споруди з використанням методу Монте–Карло. Перспективи розвитку будівельних технологій: Матеріали 11-ї Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів (Дніпро, 20-21 квітня, 2017 р.). Дніпро: НГУ, 2017. С. 57–61.
5. Картозия Б.А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции. *Горный информ.-аналит. бюлл.* 2015. № 51. С. 615–629.
6. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. Морфологічний аналіз. Теорія, проблеми, застосування. Навч. посібник. Київ: Наук. думка, 2015. 245 с.

Надійшло до редакції 20.06.2018

REFERENCES

1. Pankratova, N., Gayko, G., Kravets, V. & Savchenko, I. (2016). Problems of Megapolises Underground Space System Planning. *Journal of Automation and Information Sciences*, 48, Iss. 4, pp. 32–38. doi: <http://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.40>
2. Kaufman, L. & Lysikov, B. A. (2009). *Geotechnical risks of underground construction*. Donetsk: Nord-Press (in Russian).
3. Gayko, G. & Kril, G. (2015). Typization of geological environment of urbanized territories when developing underground space. *Proceedings of the 14 Inter. sci.-pract. conf. Modern information technologies of managing ecological safety, natural resource usage, emergency measures, Kyiv* (in Ukrainian).
4. Gayko, G. & Matviichuk, I. (2017). Statement of the probabilistic problem of evaluating impact factors for urban underground structures using Monte-Carlo method. *Proceedings of the 11 Inter. sci.-pract. conf. of young scientists, postgraduates and students, Dnipro* (in Ukrainian).
5. Kartosiya, B. (2015). Developing underground space of large cities. *New tendencies. Mining inform.-anal. bull., No. 51*. pp. 615-629 (in Russian).
6. Pankratova, N. & Savchenko, I. (2015). *Morphological analysis. Problems, theory, applications. Textbook*. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).

Received 20.06.2018

Н.Д. Панкратова, И.А. Савченко, Г.И. Гайко, В.Г. Кравец

НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сикорського”

E-mail: natalidmp@gmail.com, savil.ua@gmail.com, gayko.kpi@meta.ua, kravets@geobud.kiev.ua

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОСВОЕНИЮ ПОДЗЕМНОГО
ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И МНОГОФАКТОРНЫХ РИСКОВ**

Представлен системный подход к освоению подземного пространства, формализующий процесс оценки неопределенностей и многофакторных рисков и принятия решения о целесообразности использования территории (геологической среды) для городского подземного строительства. Разработана морфологическая модель оценки участков строительства подземных объектов, созданы морфологические таблицы, обоснованы альтернативы состояний и шкалы экспертных оценок, построены матрицы взаимосвязей факторов влияния и альтернатив параметров.

Ключевые слова: городское подземное строительство, геологическая среда, оценка рисков, принятие решений, метод морфологического анализа.

N.D. Pankratova, I.O. Savchenko, H.I. Haiko, V.H. Kravets

NTU of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

E-mail: natalidmp@gmail.com, savil.ua@gmail.com, gayko.kpi@meta.ua, kravets@geobud.kiev.ua

**A SYSTEM APPROACH TO DEVELOPING
THE UNDERGROUND SPACE OF METROPOLISES UNDER
CONDITIONS OF UNCERTAINTY AND MULTIFACTOR RISKS**

A system approach to developing the underground space that formalizes the evaluation of uncertainty and multifactor risks and the decision-making regarding the suitability of a location (geological environment) for the urban underground construction is presented. A morphological model for evaluating the construction sites of underground objects is constructed, morphological tables are created, the parameter alternatives are justified, and the cross-consistency matrices for impact factors and parameter alternatives are estimated.

Keywords: urban underground construction, geological environment, risk estimation, decision-making, morphological analysis method.