

УДК 624.1 : 303.732

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0305>**Геннадій Гайко,**

доктор технічних наук,  
професор кафедри геоінженерії,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4263-5958>  
E-mail: [h.haiko@kpi.ua](mailto:h.haiko@kpi.ua)

**Іван Назаренко,**

доктор технічних наук,  
професор кафедри машини і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва та архітектури  
проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>  
E-mail: [ii\\_nazar@ukr.net](mailto:ii_nazar@ukr.net)

**Ілля Савченко,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри математичних методів системного аналізу,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-5425>  
E-mail: [savil.ua@gmail.com](mailto:savil.ua@gmail.com)

**КОМБІНОВАНА МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ПРІОРИТЕТІВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ТУНЕЛІВ КИЄВА**

**АНОТАЦІЯ.** Проведено аналіз можливостей зниження кліматичних (екологічних), техногенних та безпекових ризиків у транспортній інфраструктурі міста Києва в разі будівництва системи автомобільних тунелів, передбачених у Генеральному плані м. Києва. При цьому ключові структурно-функціональні фактори впливу включали: тип забудови в районі потенційного тунелю, фактор середмістя, щільність населення, щоденний маятниковий рух, щільність магістральної мережі, середню швидкість руху в години пік, наземну зв'язаність кінців (порталів) тунелів автошляхами, пропускну здатність автомобільних доріг, ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури, вразливість внаслідок воєнних атак або терактів. У дослідженні був застосований модифікований метод морфологічного аналізу, який враховував групи кліматичних (екологічних) та техногенних ризиків, а також воєнних (терористичних) загроз. З урахуванням цього побудовано модель підтримки прийняття рішень щодо визначення пріоритетності та ранжування (доцільної черговості) будівництва тунелів. Крім того, було запропоновано комбінування процесу морфологічного аналізу з методом аналізу ієрархій, що забезпечило альтернативні точки зору з дещо іншим рейтингом тунелів порівняно з базовою моделлю у відповідності до заданої пріоритетності (ваги) того чи іншого ризику при прийнятті рішень. Цей підхід може бути корисним для розвитку транспортної політики з метою наближення до кліматичної нейтральності великих міст, а також для максимального захисту міської транспортної інфраструктури в умовах воєнних загроз. Використовуючи отримані в роботі системні інструменти та комбіновані моделі, міська спільнота може стати безпечнішою та стійкішою, керуючи транспортною політикою на засадах системного підходу та багатокритеріального аналізу факторів впливу.

**Ключові слова:** міський сталий розвиток, кліматична нейтральність, планування транспортної інфраструктури, автомобільні тунелі, системний аналіз.

## COMBINED DECISION SUPPORT MODEL FOR DEVELOPMENT PRIORITIES OF THE KYIV CAR TUNNEL NETWORK

**ABSTRACT.** An analysis is conducted for the opportunities to reduce climate (ecological), technogenic and safety risks in the Kyiv transport infrastructure in case of construction of the car tunnel system envisioned in the Kyiv city General plan. The involved structural and functional factors included district type in the potential tunnel's area, downtown factor, population density, daily pendular movement, arterial network density, average traffic speed at peak hours, surface connectivity of the exits (portals) of the tunnel by automobile roads, surface road throughput, criticalness of the transport infrastructure object, and vulnerability in case of military attacks or terrorist acts. The modified morphological analysis method was applied in the research, that considered groups of climate (ecological) and technogenic risks, and also the military (terrorist) threats. This became the basis for construction of the decision support model regarding the evaluation of priorities and rankings (rational order) of tunnel construction. Additionally, a combination of morphological analysis with analytical hierarchy process was proposed that provided alternative viewpoints with a different ranking compared to the basic model, depending on the given priorities (weights) of risk factors during decision making. This approach may be useful for development of the transport policy with the goal of approaching climate neutrality for big cities, as well as maximum protection of urban transport infrastructure in conditions of wartime threats. Using the developed system tools and combined models, the urban society can become safer and more resilient, managing transport policies on the basis of the system approach, and multi-criteria analysis of impact factors.

**Keywords:** sustainable urban development, climate neutrality, transport infrastructure planning, car tunnels, system analysis.

### 1. Постановка проблеми.

Регулювання міського розвитку з метою підвищення кліматичних (екологічних) стандартів, зручності та безпеки життя в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найактуальніших, але недостатньо вивчених комплексних глобальних проблем [1, 2]. Однією з особливостей розвитку сучасного мегаполісу є значне розширення та ускладнення міської інфраструктури (зокрема, її транспортної мережі), що призводить до зростання ризиків та загроз для її ефективного та безпечного функціонування. Світові концепти сталого розвитку великих міст приділяють значну увагу здатності підземного простору взяти на себе функції найбільш вразливих і ризикованих наземних об'єктів і комунікацій, забезпечуючи таким чином мінімізацію кліматичних (екологічних) і техногенних ризиків [3–5]. Останнім часом поряд із зазначеними традиційними групами ризиків міської транспортної інфраструктури актуалізувалася додаткова група ризиків, пов'язана з військовими та терористичними загрозами. Після 24 лютого 2022 року (початок російської агресії проти України) міський підземний простір активно розглядається, а в Україні використовується на практиці, як зона захисту цивільного населення та критичної інфраструктури від потенційних ударів з повітря. Виникає потреба розвитку міського підземного простору як способу забезпечення надійних і безпечних зон урбаністичного середовища та комунікацій в умовах можливої конвенційної війни (використання підземних споруд за подвійним призначенням), що формує додаткові стимули збільшення масштабів підземного будівництва.

Згідно даних Генерального плану м. Києва [6] територія міста складає 826,4 км<sup>2</sup>. Чисельність постійного населення – 2,91 млн. осіб (фактично – понад 3,3 млн.). Основа архітектурно-планувальної композиції міста зумовлена наявністю великої ріки (Дніпро), потужним піднесеним прибережним рельєфом правого берега з характерними крупними по членуванню територіями, що визначались ерозійними процесами і локальною гідрографією. В економічному комплексі міста зайнято 1,73 млн. осіб, при цьому на лівобережжі Дніпра проживає 36% мешканців міста, а розміщується лише 15% робочих місць, на правобережжі – 64% мешканців і 85% робочих місць, що сприяє сталій тенденції маятникового руху працівників через Дніпро, що спричиняє наднормативне навантаження на мости і основні магістралі (подібний процес спостерігається також при маятниковому русі працівників із правобережних передмість Києва до ядра міста). Середня щільність населення на території міста складала 3,4 тис. осіб на кв. км. Кількість туристів, що обслуговувались у місті – 2,1 млн. осіб на рік (2019).

Магістральна вулична мережа складає 760 км, середня щільність мережі – 2,2 км/км<sup>2</sup>, кількість мостових автодорожніх переходів через Дніпро – 5, загальний рівень автомобілізації – 370 авто на 1 тис. мешканців. Протяжність Київського метрополітену складає 67,7 км, кість станцій – 52 (Генеральним планом передбачається збільшення протяжності до 99,8 км та кількості станцій до 81). Річний обсяг пасажирських перевезень метрополітену – 496,1 млн. пасажирів. У місті також функціонує міська залізниця (6,9 млн.), швидкісний та звичайний трамвай (107,1 млн.), тролейбус (137,1 млн.) і автобус (416 млн.).

Для збільшення загальної мобільності автотранспорту, ефективного розвитку автодорожньої мережі, поліпшення зв'язків між окремими районами (зокрема лівим і правим берегами Дніпра) Генеральним планом м. Києва передбачалося будівництво системи з 8 автомобільних тунелів (рис. 1), проте фахові й суспільні дискусії щодо доцільності повного обсягу їх будівництва продовжуються, що знайшло певні відображення в більш стриманому підході до перспектив тунелебудування при останньому перегляді Генерального плану [6].

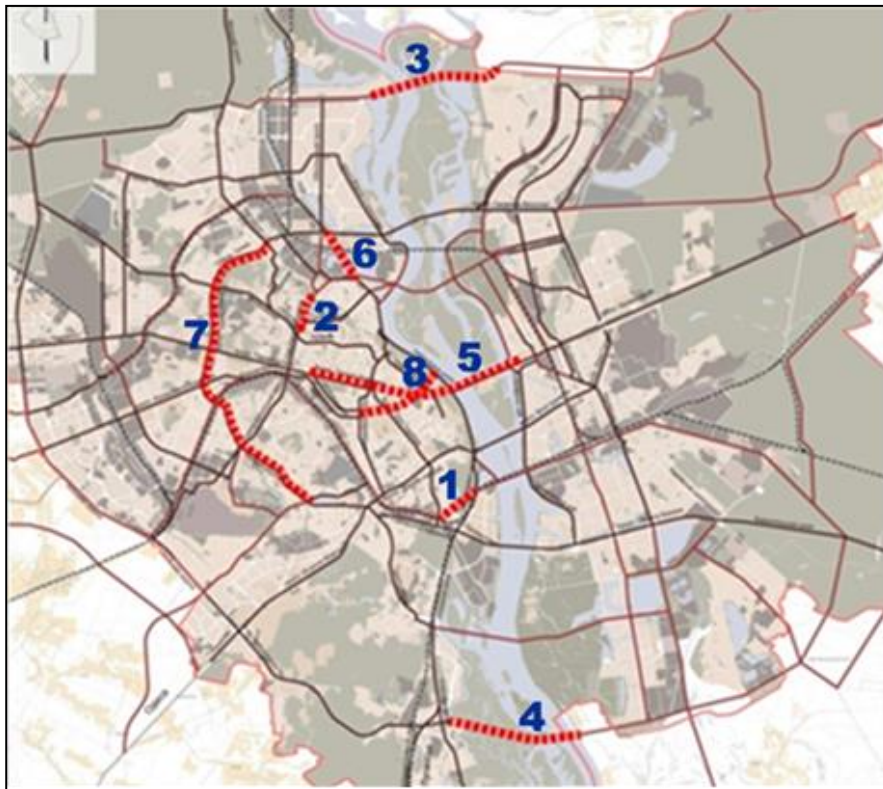


Рис. 1. Схема запланованих ділянок тунелів відповідно до Генерального плану м. Києва  
Fig. 1. Scheme of the planned tunnel tracks according to the Kyiv city General plan

Зазначені на рис. 1 тунелі можна поділити на 3 групи: 1) сполучення лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями, тунелі під Дніпром (3, 4, 5); забезпечення найкоротшого та найзручнішого маршруту руху з урахуванням рельєфу місцевості, тунелі під пагорбами (1, 2, 5, 6, 8); розподіл транспорту на перевантажених трасах (дублювання автомагістралей), тунелі під протяжними автомагістралями (5, 7).

Повоєнне відновлення столиці України вже зараз потребує аналізу та перегляду довоєнних планів розвитку міста, зокрема великих інфраструктурних проектів тунельного будівництва, що зумовлено зокрема необхідністю найбільш ефективного розвитку інвестиційної політики для швидкого наближення м. Києва до стандартів ЄС щодо безпеки, кліматичної (екологічної) нейтральності, транспортного комфорту тощо. Враховуючи можливості повоєнної підтримки великих інфраструктурних проектів в Україні з боку європейських партнерів, можна передбачити початок розвитку мережі автомобільних тунелів Києва вже в короткостроковій

перспективі, що потребує прийняття рішень щодо пріоритетності їх будівництва та уточнення трас.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання будівництва мережі автомобільних тунелів Києва, зокрема – тунелів під Дніпром [7, 8], має широке медійне, фахове і суспільне обговорення (наприклад – в Академії будівництва України, в Департаменті транспортної інфраструктури КМДА тощо) із загальним висновком щодо необхідності початку проектування та будівництва перших тунелів, актуальність яких ще більше зросла в умовах воєнних загроз. Проблему прийняття рішень при плануванні транспортної інфраструктури великих міст (зокрема – розвитку системи автомобільних тунелів м. Києва) можна віднести до слабкоструктурованих проблем, в яких цілі, структура та умови відомі лише частково і характеризуються неточністю, неповнотою, невизначеністю, нечіткістю даних, що описують об'єкт і фактори впливу, що потребує цілісного інтегрованого підходу та наукового системного інструментарію планування [3, 9]. Як показує низка досліджень проблем урбаністичного простору [10, 11], такою системною методологією підтримки процесу планування може бути морфологічний аналіз, зокрема його модифікований метод, розроблений за участю авторів для планування підземної урбаністики [3, 12–14]. Для більш ефективного управління процесом прийняття рішень доцільно ранжувати важливість (значимість) різноманітних ризиків (які розглядаються в морфологічній моделі) в залежності від актуальності проблем міського розвитку та філософії міста [15, 16]. Для цього авторами було використано можливості методу аналізу ієрархій [17, 18] і його модифікації [19, 20].

**3. Мета роботи.** Розробити набір системних інструментів щодо синтезу морфологічної моделі, яка враховує групу структурних та функціональних факторів для формалізації процесу прийняття планувальних рішень щодо пріоритетності будівництва автомобільних тунелів м. Києва, з модифікованим методом аналізу ієрархій, який дозволить врахувати важливість (вагу) різноманітних ризиків під час прийняття рішень. Розроблена комбінована модель має на меті охопити в комплексі не лише існуючий стан міського простору, але й тенденції подальшого розвитку, включаючи потребу у більшій стійкості у воєнний час і сприяттві кліматичній нейтральності міського транспорту.

**4. Матеріали та методи.** Проблема розвитку мережі автомобільних тунелів Києва є комплексною системною задачею, яка для всебічного і ґрунтовного дослідження вимагає застосування системного підходу [9]. Процес системного аналізу може включати ряд методів якісного аналізу, таких як метод Делфі, метод перехресного впливу, метод морфологічного аналізу, метод аналізу ієрархій тощо, що дозволяють детально вивчати складні об'єкти і системи з урахуванням невизначеностей, багатофакторних ризиків, змін із часом, що не можуть бути передбачені на основі минулих трендів. Для даного дослідження було вирішено застосувати комбінований підхід на основі модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій.

Метод морфологічного аналізу [11, 21] і його модифікація [14] – це потужний інструмент дослідження об'єктів, яким притаманна суттєва невизначеність, з поглибленим аналізом взаємозв'язків між компонентами такого об'єкта та кількісною оцінкою факторів впливу та критеріїв ризику. Цей метод успішно був застосований для багатьох задач підземної урбаністики [12], зокрема для оцінювання ділянок підземного будівництва [22], в тому числі комплексного (інженерно-геологічні та структурно-функціональні фактори) оцінювання ділянок під підземні паркінги [13], аналізу впливу небажаних подій на урбаністичні об'єкти [23] тощо. В основі методу лежить багатократна комбінаторика заданого об'єкта у множині різних параметрів впливу, що дає можливість дослідити велику кількість конфігурацій цього об'єкта, комбінуючи різні значення кожного з параметрів. При цьому генерується значний об'єм аналітичної інформації, яка може бути складною для сприйняття людиною, що не є аналітиком, тому результати методу зазвичай потребують додаткової адаптації і візуалізації для осіб, що приймають рішення. Для імплементації даної процедури застосовувались програмні засоби на основі SAS Studio з авторськими модулями Microsoft Visual Studio, що відповідають основним етапам модифікованого методу морфологічного аналізу.



Метод аналізу ієрархій [17, 18] і його модифікація [19, 20] орієнтовані в першу чергу на задачу підтримки прийняття рішень, з використанням складної ієрархічної структури для врахування всіх цілей і критеріїв, що впливають на загальне рішення. Цей метод також застосовувався в ряді задач, зокрема, вибору пріоритетних заходів вирішення соціальних проблем м. Києва, оцінювання сценаріїв розвитку транспортної системи м. Києва [19], оцінювання пріоритетності екологічних проєктів Одеської області [24] тощо. Метод дає змогу отримати обґрунтоване ранжування ряду об'єктів, однак при цьому потрібні експертні парні порівняння, що вносить певний суб'єктивізм у процес оцінювання, особливо у разі заангажованості експерта щодо деяких альтернатив; також при появі великої кількості альтернатив необхідна кількість експертних оцінок швидко зростає.

Комбінування цих двох методів дозволяє поєднати їх сильні сторони для отримання моделі, що може обробити велику кількість конфігурацій об'єкта і при цьому дати чіткий результат у відповідності до поставлених цілей. В даному дослідженні комбінована процедура модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій складалась із наступних кроків:

1. Визначення структурно-функціональних факторів ділянки, запланованої під будівництво автомобільного тунелю, і факторів ризику, які будівництво тунелю може мінімізувати.
2. Побудова двоетапної моделі модифікованого методу морфологічного аналізу для довільної ділянки, що на основі аналізу структурно-функціональних факторів цієї ділянки оцінює важливість і вплив майбутнього тунелю на обрані фактори ризику.
3. Внесення інформації про конкретні ділянки і розрахунок впливів потенційних тунелів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу.
4. Автоматичне перетворення отриманих результатів для генерування парних порівнянь, і в подальшому локальних ваг тунелів відносно факторів ризику.
5. Порівняння факторів ризику за важливістю, і розрахунок пріоритетів ділянок на основі методу аналізу ієрархій.

Для аналізу структурно-функціональних факторів був взятий перелік із одного з попередніх досліджень підземного простору м. Києва [13], розширений з урахуванням безпекових факторів. Таким чином, на першому етапі морфологічного аналізу розглядалися десять параметрів, що відповідають цим факторам:

1. Тип забудови в районі потенційного тунелю.
2. Фактор середмістя.
3. Щільність населення.
4. Маятниковий рух працівників (на роботу – з роботи).
5. Щільність магістральної мережі.
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю.
7. Наземна зв'язаність кінців (порталів) тунелю автошляхами.
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю.
9. Ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури.
10. Стан вразливості транспортної інфраструктури.

На основі цих десяти взаємопов'язаних факторів оцінювався вплив потенційного тунелю на такі шість факторів ризику:

1. Забруднення повітря.
2. Шум і динамічні впливи.
3. Дорожні затори.
4. Дорожні аварії.
5. Протяжність маршруту сполучення.
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів.

Ці фактори ризику лягли в основу морфологічної таблиці другого етапу. Одним із параметрів була важливість кожного фактору на конкретній ділянці; таким чином створювався

унікальний «профіль» ділянки, який визначав, що саме є критичним на даній ділянці – наприклад, для житлової забудови мінімізація забруднення повітря і шуму є більш важливою, ніж для району переважно промислової забудови. Решта параметрів стосувались безпосередньо здатності потенційного тунелю вплинути на кожен конкретний фактор ризику. Вплив оцінювався альтернативами, що відображали 4 рівні: «Не впливає», «Частково мінімізує», «Помірно мінімізує», «Суттєво мінімізує».

За допомогою людино-машинної процедури введення даних були заповнені матриця взаємозв'язків (для врахування взаємовпливів між структурно-функціональними параметрами на першому етапі методу), і матриця зв'язків (для передачі впливу значень структурно-функціональних параметрів на фактори ризику). Отримана модель дозволяє оцінити будь-які території, призначені для будівництва 8 тунелів, представлених у Генеральному плані м. Києва (див. рис. 1).

**5. Результати досліджень.** Після розрахунків за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу для кожного з тунелів були отримані ваги факторів ризику (табл. 1), і їх потенційні впливи на відповідні фактори ризику. Приклад розрахунку впливів показаний в табл. 2 для фактору «Забруднення повітря». Такі ж таблиці були отримані для всіх інших факторів.

Таблиця 1. Розраховані ваги факторів ризику для ділянок, що відповідають тунелям 1–8

Table 1. Calculated risk factor importance for sites of the tunnels 1–8

| № тунелю | Забруднення повітря | Шум і динамічні впливи | Дорожні за-тори | Дорожні аварії | Протяжність маршруту сполучення | Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів |
|----------|---------------------|------------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|---|
| 1        | 0,152               | 0,11                   | 0,274           | 0,141          | 0,184                           | 0,139   |
| 2        | 0,062               | 0,032                  | 0,379           | 0,036          | 0,331                           | 0,16  |
| 3        | 0,031               | 0,018                  | 0,276           | 0,049          | 0,294                           | 0,332   |
| 4        | 0,02                | 0,008                  | 0,315           | 0,049          | 0,317                           | 0,291   |
| 5        | 0,051               | 0,029                  | 0,331           | 0,029          | 0,324                           | 0,236   |
| 6        | 0,044               | 0,02                   | 0,439           | 0,037          | 0,3                             | 0,161   |
| 7        | 0,15                | 0,093                  | 0,352           | 0,081          | 0,19                            | 0,133   |
| 8        | 0,081               | 0,054                  | 0,331           | 0,05           | 0,303                           | 0,182   |

Таблиця 2. Розраховані впливи тунелів на фактор «Забруднення повітря»

Table 2. Calculated tunnels' impacts on the factor "Air pollution"

| № тунелю | Не впливає | Частково мінімізує | Помірно мінімізує | Суттєво мінімізує |
|----------|------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1        | 0,013      | 0,266              | 0,463             | 0,259             |
| 2        | 0,003      | 0,23               | 0,577             | 0,189             |
| 3        | 0,019      | 0,274              | 0,599             | 0,108             |
| 4        | 0,021      | 0,298              | 0,631             | 0,05              |
| 5        | 0,000      | 0,104              | 0,543             | 0,353             |
| 6        | 0,007      | 0,296              | 0,57              | 0,127             |
| 7        | 0,001      | 0,139              | 0,457             | 0,404             |
| 8        | 0,002      | 0,191              | 0,525             | 0,282             |

З таблиці 1 бачимо, що, наприклад, тунелі 3 і 4 мають найбільші ваги факторів «Протяжність маршруту сполучення» і «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів», оскільки ці ділянки відповідають мостовим переходам, що є критичними з точки зору поєднання кінців потенційного тунелю автошляхами, і найбільш важкими у відновленні в разі ворожих атак або терактів. Для тунелів, де є більша можливість дублювання наземними шляхами, профілі важливості факторів суттєво відрізняються.

Таблиця 2 демонструє різницю між тунелями з точки зору їх потенційного впливу на забруднення повітря. Хоча переважна більшість тунелів має найбільшу вагу значення «Помірно мінімізує», можна побачити, що найбільш протяжна ділянка 7 має також і найвищу серед розглянутих альтернатив вагу значення «Суттєво мінімізує», відображаючи потенційно більш значний вплив побудови цього тунелю на відповідний фактор.

На основі таблиці 2, і аналогічних таблиць, що відповідають іншим факторам ризику, були розраховані локальні ваги ділянок відносно кожного з факторів ризику, як це потрібно для процедури методу аналізу ієрархій. Для цього формувались матриці парних порівнянь ділянок відносно кожного з факторів ризику, за допомогою наступного співвідношення:

$$d_{ij}^{(f)} = -2(w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) - (w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}) + (w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) + 2(w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}), i, j \in \overline{1,8}, \quad (1)$$

де  $f$  – фактор ризику;  $w_{i,n}^{(f)}$  – оцінка значення «не впливає» для ділянки  $i$  і фактору ризику  $f$ ;  $w_{i,c}^{(f)}$ ,  $w_{i,n}^{(f)}$ ,  $w_{i,c}^{(f)}$  – оцінки значень, відповідно, «частково мінімізує», «помірно мінімізує» і «суттєво мінімізує» для ділянки  $i$  і фактору ризику  $f$ .

На основі співвідношення (1) легко довести, що  $d_{ij}^{(f)} = -d_{ji}^{(f)}$ ,  $d_{ii}^{(f)} = 0$ , тобто матриця, задана цими величинами, буде коректною адитивною матрицею парних порівнянь. Також легко довести, що  $\forall_{i,j,f} d_{ij}^{(f)} \in [-4; 4]$  (крайні випадки спостерігаються лише тоді, коли одна ділянка має оцінку значення «не впливає», рівну 1, тоді як друга ділянка має оцінку значення «суттєво мінімізує», рівну 1). Перейдемо до мультиплікативної матриці за допомогою співвідношення (2):

$$d'_{ij}{}^{(f)} = 9^{\frac{d_{ij}^{(f)}}{4}}. \quad (2)$$

Матриця  $D'$  на основі співвідношень (2) буде коректною мультиплікативною матрицею, до якої застосовні методи отримання ваг [25]. Крім того, легко довести, що вона буде теоретично узгодженою, а отже отримані ваги не залежать від способу їх розрахунку. Скористаємось методом власних векторів ЕМ [25] для їх розрахунку. Для розглянутих ділянок тунелів локальні ваги за кожним із критеріїв наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Локальні ваги тунелів відносно факторів ризику (найбільше значення серед всіх ділянок для кожного фактору виділено напівжирним)

Table 3. Local weights of the sites respective to the risk factor (the highest value among all sites for each factor is bolded)

| № тунелю | Забруднення повітря | Шум і динамічні впливи | Дорожні затори  | Дорожні аварії  | Протяжність маршруту сполучення | Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів |
|----------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---|
| 1        | 0,119752            | 0,142614               | 0,073593        | 0,118965        | 0,080317                        | 0,084207  |
| 2        | 0,121742            | 0,116512               | 0,142816        | 0,137003        | 0,133499                        | 0,125402  |
| 3        | 0,108121            | 0,097731               | 0,126838        | 0,095813        | 0,144171                        | 0,145211  |
| 4        | 0,10167             | 0,081887               | 0,139329        | 0,068121        | <b>0,149165</b>                 | 0,146573  |
| 5        | <b>0,153839</b>     | 0,149184               | <b>0,152463</b> | 0,162258        | 0,14096                         | <b>0,147948</b>                                 |
| 6        | 0,108776            | 0,101953               | 0,134738        | 0,099405        | 0,137292                        | 0,126717  |
| 7        | 0,152075            | <b>0,164418</b>        | 0,099496        | <b>0,170481</b> | 0,082192                        | 0,100114  |
| 8        | 0,134026            | 0,145702               | 0,130728        | 0,147954        | 0,132404                        | 0,123827  |

Як бачимо з табл. 3, тунель 5 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Забруднення повітря», «Дорожні затори», «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»; тунель 7 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Шум і динамічні впливи», «Дорожні аварії»; тоді як тунель 4 має найвищий показник впливу на фактор «Протяжність маршруту сполучення».

Для більш комплексного оцінювання потрібна інтегрована оцінка на основі методу аналізу ієрархій. Для неї, окрім локальних ваг альтернатив ділянок відносно факторів ризику, потрібні також оцінки власне факторів ризику. Тут пропонуються два підходи:

- 1) використання в якості ваги оцінки важливості відповідного фактору ризику, отриманої в результаті модифікованого методу морфологічного аналізу (табл. 1);
- 2) використання окремого експертного оцінювання для порівняння критеріїв, і визначення ваг на основі методів обробки матриць парних порівнянь.

В першому підході процес є більш автоматизований, оскільки він не потребує додаткових вхідних даних, і враховує потреби конкретної ділянки (усі ризики мають рівну пріоритетність і вагу), тоді як другий підхід є більш гнучкий, і дозволяє оцінити рішення з урахуванням цілей і вимог осіб, що приймають рішення (пріоритетний ризик при цьому має збільшену вагу).

Другий підхід проілюстрований оцінюванням факторів трьома експертами, що ставлять різні цілі при визначенні пріоритетності ділянок: 1) з точки зору безпеки; 2) з точки зору екології та кліматичної нейтральності; 3) з точки зору ефективності транспортної системи. При цьому враховується весь спектр ризиків, але пріоритетна роль (збільшена вага) відводиться в цьому випадку саме цільовому фактору. Відповідні матриці парних порівнянь факторів, і їх результуючі ваги наведені в табл. 4–6. Ваги були отримані методом власних векторів ЕМ, неузгодженість матриць парних порівнянь не перевищувала порогові значення [25].

Таблиця 4. Ваги факторів ризику при пріоритезації безпеки громадян  
Table 4. Risk factor weights when city dwellers' safety is prioritized

| № фактору  | 1   | 2 | 3   | 4   | 5   | 6   | Вага  |
|--|-----|---|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1. Забруднення повітря                             | 1   | 2 | 1/2 | 1   | 1/2 | 1/8 | 0,062 |
| 2. Шум і динамічні впливи                          | 1/2 | 1 | 1/4 | 1/2 | 1/4 | 1/9 | 0,035 |
| 3. Дорожні затори                                  | 2   | 4 | 1   | 5   | 5   | 1/6 | 0,194 |
| 4. Дорожні аварії                                  | 1   | 2 | 1/5 | 1   | 1   | 1/8 | 0,059 |
| 5. Протяжність маршруту сполучення                 | 2   | 4 | 1/5 | 1   | 1   | 1/8 | 0,08  |
| 6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів | 8   | 9 | 6   | 8   | 8   | 1   | 0,569 |

Таблиця 5. Ваги факторів ризику при пріоритезації екології та кліматичної нейтральності  
Table 5. Risk factor weights when ecology and comfort are prioritized

| № фактору  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5 | 6 | Вага  |
|--|-----|-----|-----|-----|---|---|-------|
| 1. Забруднення повітря                             | 1   | 2   | 4   | 3   | 6 | 7 | 0,417 |
| 2. Шум і динамічні впливи                          | 1/2 | 1   | 2   | 1   | 3 | 4 | 0,202 |
| 3. Дорожні затори                                  | 1/4 | 1/2 | 1   | 1   | 1 | 2 | 0,106 |
| 4. Дорожні аварії                                  | 1/3 | 1   | 1   | 1   | 2 | 2 | 0,141 |
| 5. Протяжність маршруту сполучення                 | 1/6 | 1/3 | 1   | 1/2 | 1 | 1 | 0,074 |
| 6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів | 1/7 | 1/4 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 0,06  |

Таблиця 6. Ваги факторів ризику при пріоритезації вирішення транспортних проблем  
Table 6. Risk factor weights when solving transport problems is prioritized

| № фактору  | 1   | 2 | 3   | 4   | 5   | 6 | Вага  |
|--|-----|---|-----|-----|-----|---|-------|
| 1. Забруднення повітря                             | 1   | 2 | 1/7 | 1/2 | 1/8 | 2 | 0,061 |
| 2. Шум і динамічні впливи                          | 1/2 | 1 | 1/9 | 1/4 | 1/8 | 1 | 0,037 |
| 3. Дорожні затори                                  | 7   | 9 | 1   | 4   | 1   | 8 | 0,378 |
| 4. Дорожні аварії                                  | 2   | 4 | 1/4 | 1   | 1/3 | 4 | 0,125 |
| 5. Протяжність маршруту сполучення                 | 8   | 8 | 1   | 3   | 1   | 8 | 0,362 |
| 6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів | 1/2 | 1 | 1/8 | 1/4 | 1/8 | 1 | 0,038 |



За допомогою отриманих ваг факторів ризику застосовувалась процедура дистрибутивного синтезу методу аналізу ієрархій [19]. Отримані за допомогою обох підходів оцінки ділянок, а також відповідні ранжування, наведені в табл. 7 (у другому підході розглянуто три альтернативні варіанти). Порівняння ранжувань тунелів у випадках пріоритетної ролі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків при реалізації ієрархічного підходу (підхід 2) наведено на рис. 2.

Таблиця 7. Порівняння ранжувань ділянок, отриманих різними підходами  
Table 7. Comparison of site rankings by different approaches

| № тунелю | Підхід 1 |      | Підхід 2 (безпека) |      | Підхід 2 (екологія) |      | Підхід 2 (транспорт) |      |
|----------|----------|------|--------------------|------|---------------------|------|----------------------|------|
|          | Вага     | Ранг | Вага               | Ранг | Вага                | Ранг | Вага                 | Ранг |
| 1        | 0,094089 | 8    | 0,088051           | 8    | 0,114315            | 5    | 0,087545             | 8    |
| 2        | 0,130132 | 4    | 0,129449           | 4    | 0,126161            | 4    | 0,135939             | 2    |
| 3        | 0,130925 | 3    | 0,134542           | 3    | 0,111164            | 7    | 0,12784              | 6    |
| 4        | 0,135222 | 2    | 0,135552           | 2    | 0,103144            | 8    | 0,129981             | 4    |
| 5        | 0,143032 | 1    | 0,14937            | 1    | 0,152633            | 1    | 0,149467             | 1    |
| 6        | 0,126896 | 6    | 0,125402           | 6    | 0,112015            | 6    | 0,128279             | 5    |
| 7        | 0,112028 | 7    | 0,108084           | 7    | 0,143301            | 2    | 0,107837             | 7    |
| 8        | 0,127675 | 5    | 0,12855            | 5    | 0,137267            | 3    | 0,134112             | 3    |

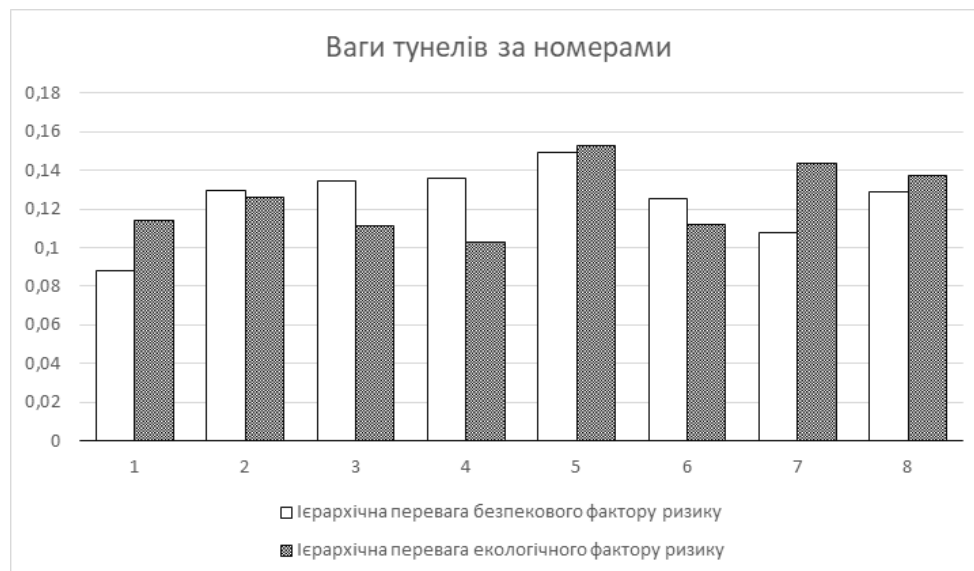


Рис. 2. Ваги тунелів при ієрархічній перевазі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків (підхід 2)

Fig. 2. Tunnel weights under hierarchical advantage of safety and climate (ecological) factors (approach 2)

Аналіз таблиць і діаграм свідчить, що у базовому випадку, коли всі розглянуті ризики мають рівну пріоритетність і вагу, перші місця рейтингу отримали тунелі 5, 4 і 3. Це пояснюється значним впливом цих тунелів на вирішення транспортної проблеми Києва, ефективним сполученням лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями та розвантаженням мостів, скороченням маршрутів, збільшенням безпеки та надійності тунельних переходів Дніпра над мостовими переходами у разі потенційних ударів з повітря тощо. У разі реалізації другого підходу й збільшення ієрархічної ваги тих чи інших пріоритетних ризиків (в залежності від їх суспільної важливості та цілей, що можуть бути закладені у планувальні рішення) маємо дещо інші результати моделювання. Прикметно, що у разі пріоритетної ролі безпекового (захисного) фактору лідерами рейтингу залишились тунелі 5, 4 і 3, що пов'язане з більшою вразливістю мостів у порівнянні з тунелями при воєнних і терористичних загрозах, а також стратегічною важливістю забезпечення в цих умовах безперешкодного зв'язку лівого і правого берегів Києва (такі споруди є важливими складовими критичної інфраструктури

міста). У разі визначення пріоритетної ролі кліматичного (екологічного) фактору найбільший рейтинг отримують тунелі 5, 7 і 8. Це пояснюється тим, що значна частина тунелю 5 дублює основну автомагістраль від площі Перемоги до річки Дніпро і значною мірою розвантажує середмістя від шкідливих автомобільних викидів, корок і транспортних простоїв, шумів, динамічних впливів тощо. Те саме стосується й тунелю 8, який додатково суттєво скорочує автомобільні шляхи між порталами тунелю. Тунель 7 є найбільш протяжним з усіх запланованих тунелів, він дублює й розвантажує протяжну автомагістраль, що огортає центральне ядро міста, й здатен значною мірою оптимізувати швидкість руху на магістралі й зменшити транспортне забруднення повітря. Вага фактору кліматичної нейтральності матиме пріоритетне значення в повоєнному відновленні міст України, враховуючи міжнародні зобов'язання країни та прийнятий Верховною Радою Закон України "Про основні засади державної кліматичної політики" (від 08.10.2024). Слід звернути увагу, що в обох розглянутих підходах і в усіх ієрархічних групах тунель 5 отримав найвищий рейтинг, що дає підстави рекомендувати його як пріоритетний (першочерговий) для будівництва.

**6. Висновки.** 1. Прискорення розвитку підземного будівництва у великих містах України буде мати пріоритетне значення в повоєнному відновленні країни та реалізації міжнародних інфраструктурних проєктів, що значною мірою зумовлене пріоритетними впливами міського підземного простору (зокрема – підземних транспортних мереж) на безпекові та кліматичні (екологічні) чинники. Перегляд довоєнних планів розвитку міста, зокрема великих інфраструктурних проєктів тунельного будівництва, потребує прийняття науково обґрунтованих рішень щодо пріоритетності будівництва тунелів та уточнення трас.

2. Серед важливих напрямків структурування складних проблем і врахування багатьох критеріїв впливу слід зазначити модифікований авторами метод морфологічного аналізу, який знайшов застосування в складних задачах планування міст і розглядається як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. Ефективність морфологічної моделі з підтримки прийняття рішень може бути підсилена шляхом синтезу з методом аналізу ієрархій, що забезпечує варіативний результат у відповідності до поставлених цілей (ієрархії ризиків). Така комбінована модель була застосована для аналізу мережі автомобільних тунелів Генерального плану м. Києва. Розроблений інструментарій дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективні можливості для прийняття проєктних рішень, виходячи із системних позицій і суспільної ваги факторів ризику.

3. Результати моделювання дозволяють рекомендувати групу тунелів 5, 4 і 3 як пріоритетні для будівництва в Києві за базовим варіантом і за безпековим фактором при ієрархічному підході. Цей же підхід визначає тунелі 5, 7 і 8 пріоритетними за кліматичним (екологічним) фактором. В обох розглянутих підходах і в усіх ієрархічних групах тунель 5 отримав найвищий рейтинг і може розглядатися як першочерговий для будівництва.

### Список використаних джерел:

1. Shlomo, A. (2023). Urban expansion: theory, evidence and practice. *Buildings & Cities*, 4 (1), 124–138. <https://doi.org/10.5334/bc.348>
2. Radomska, M., Ratushnyuk, L., Yaroshenko, D., Yarokhmedova, I., Guz, V., Melnychenko V. (2023). Comparative analysis of strategies for adaptation of urban areas to climate changes. *Техніка будівництва*, 2 (39), 50–58. <https://doi.org/10.32347/tb.2023.2-39.0201>
3. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. (2020). Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. Київ: Наукова думка, 134.
4. *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*; Gilbert, P. et al. (Eds.) (2013). Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14670>
5. Vähäaho, I. (2014). Underground space planning in Helsinki. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (5), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
6. Генеральний план міста Києва. Основні положення (Проєкт), Київ. Available at: <https://www.slideshare.net/andrewvodiani/ss-230454864>.

7. Захарченко, П.В., Гайко, Г.І. (2015). Прогноз розвитку інфраструктури Києва в короткотерміновій перспективі. Перша міжнародна науково-практична конференція «Регіональна політика: законодавча політика і практична реалізація». Київ: КНУБА, 25–33.
8. Гайко, Г.І., Захарченко, П.В. (2016). Перспективи будівництва тунельних переходів Дніпра. Підводні технології, № 4, 72–79. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/817>
9. Zgurovsky, M.Z., Pankratova, N.D. (2007). System analysis: Theory and Applications. Springer, 475.
10. Zeiler, W. (2018). Morphology in conceptual building design. Technological Forecasting and Social Change, 126, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.012>.
11. Ritchey, T. (2018). General morphological analysis as a basic scientific modelling method. Technological Forecasting and Social Change, 126, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
12. Pankratova, N., Haiko, H., Savchenko, I. (2024). Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. The Urban Book Series, Springer, 256. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Haiko, H., Savchenko, I.; Zgurovsky, M., Pankratova, N. (Eds.) (2022). Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. System Analysis & Intelligent Computing. Springer, 93–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6).
14. Панкратова, Н.Д., Савченко, І.О. (2015). Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування. Навчальний посібник. Київ: Наукова думка, 245.
15. Проектування міських територій: підручник: у 2 ч. Ч.1; за ред. В.Т. Семенова, І.Е. Линник. (2018). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 449.
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., Nazarenko, M. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.) (2021). Assessment of the current state of parameters and operating modes of technological technical systems. Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 3-13. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7>
17. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1 (1), 83–98. <http://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
18. Saaty, T.L., De Paola, P. (2017). Rethinking design and urban planning for the cities of the future. Buildings, 7 (3), 76. <https://doi.org/10.3390/buildings7030076>.
19. Панкратова, Н.Д., Недашківська, Н.І. (2010). Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування: Навчальний посібник. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 371.
20. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2014). Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives Cybernetics and Systems Analysis, 50 (5), 701–711. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9660-2>
21. Alvarez, A., Ritchey, T. (2015). Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. Acta Morphologica Generalis 4 (1).
22. Haiko, H.I., Savchenko, I.O., Matviichuk, I.O. (2019). Development of a morphological model for territorial development of underground city space. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, 92–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
23. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2021). Morphological model for underground crossings of water objects. System Research and Information Technologies, 2021 (4), 53–67. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04>
24. Nedashkovskaya, N. (2022). Comparison Analysis of Prioritization Quality Criteria Using Paired Comparison Method of Prioritization. IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923027>
25. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2007). Method for processing fuzzy expert information in prediction problems. Part I. Journal of Automation and Information Sciences, 39 (4), 26–36. <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v39.i4.30>

## References:

1. Shlomo, A. (2023). Urban expansion: theory, evidence and practice. Buildings & Cities, 4 (1), 124–138. <https://doi.org/10.5334/bc.348>
2. Radomska, M., Ratushnyuk, L., Yaroshenko, D., Yarokhmedova, I., Guz, V., Melnychenko V. (2023). Comparative analysis of strategies for adaptation of urban areas to climate changes. Техніка будівництва, 2 (39), 50–58. <https://doi.org/10.32347/tb.2023.2-39.0201>

3. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2020). Rozvytok pidzemnoii urbanistyky iak systemy alternatyvnykh proiektnykh konfiguratsii. Kyiv: Naukova dumka, 134. {In Ukrainian}
4. Underground Engineering for Sustainable Urban Development; Gilbert, P. et al. (Eds.) (2013). Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14670>
5. Vähäaho, I. (2014). Underground space planning in Helsinki. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (5), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
6. Heneralnyi plan mista Kyieva. Osnovni polozhennia (Proiekt), Kyiv. Available at: <https://www.slideshare.net/andrewvodiany/ss-230454864>. {In Ukrainian}
7. Zakharchenko, P.V., Haiko, H.I. (2015). Prohnoz rozvytku infrastruktury Kyieva v korotkotermynovii perspektyvi. Persha mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia “Rehionalna polityka: zakonodavcha polityka i praktychna realizatsiia”. Kyiv: KNUBA, 25–33. {In Ukrainian}
8. Haiko, H.I., Zakharchenko, P.V. (2016). Perspektyvy buduvannia tunelnykh perekhodiv Dnipra. Pidvodni tekhnolohii, 4, 72–79. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/817> {In Ukrainian}
9. Zgurovsky, M.Z., Pankratova, N.D. (2007). System analysis: Theory and Applications. Springer, 475.
10. Zeiler, W. (2018). Morphology in conceptual building design. Technological Forecasting and Social Change, 126, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.012>.
11. Ritchey, T. (2018). General morphological analysis as a basic scientific modelling method. Technological Forecasting and Social Change, 126, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
12. Pankratova, N., Haiko, H., Savchenko, I. (2024). Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. The Urban Book Series, Springer, 256. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Haiko, H., Savchenko, I.; Zgurovsky, M., Pankratova, N. (Eds.) (2022). Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. System Analysis & Intelligent Computing. Springer, 93–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6).
14. Pankratova, N.D., Savchenko, I.O. (2015). Morfolohichniy analiz. Problemy, teoriia, zastosuvannia. Navchalnyi posibnyk. Kyiv: Naukova dumka, 245. {In Ukrainian}
15. Proiektuvannia miskykh terytorii: pidruchnyk: u 2 ch. Ch. 1; Semenov, V.T., Lynnyk, I.E. (Eds.) (2018). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 449. {In Ukrainian}
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., Nazarenko, M. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.) (2021). Assessment of the current state of parameters and operating modes of technological technical systems. Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 3-13. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7>
17. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1 (1), 83–98. <http://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
18. Saaty, T.L., De Paola, P. (2017). Rethinking design and urban planning for the cities of the future. Buildings, 7 (3), 76. <https://doi.org/10.3390/buildings7030076>.
19. Pankratova, N.D., Nedashkivska, N.I. (2010). Modeli i metody analizu hierarkhii: Teoriia. Zastosuvannia: Navchalnyi posibnyk. Kyiv: IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnik», 371. {In Ukrainian}
20. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2014). Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives Cybernetics and Systems Analysis, 50 (5), 701–711. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9660-2>
21. Alvarez, A., Ritchey, T. (2015). Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. Acta Morphologica Generalis 4 (1).
22. Haiko, H.I., Savchenko, I.O., Matviichuk, I.O. (2019). Development of a morphological model for territorial development of underground city space. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, 92–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
23. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2021). Morphological model for underground crossings of water objects. System Research and Information Technologies, 2021 (4), 53–67. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04>
24. Nedashkovskaya, N. (2022). Comparison Analysis of Prioritization Quality Criteria Using Paired Comparison Method of Prioritization. IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923027>
25. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2007). Method for processing fuzzy expert information in prediction problems. Part I. Journal of Automation and Information Sciences, 39 (4), 26–36. <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v39.i4.30>