

Оцінювання екологічних ризиків розвитку підземної транспортної інфраструктури методом BOCR*

Наталія Дмитрівна Панкратова¹,

д. т. н., проф., член-кор. НАНУ, заступник директора з наукової роботи Інституту прикладного системного аналізу ¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна;

e-mail: natalidmp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6372-5813>;

Надія Іванівна Недашківська¹,

д.т.н., доцент, кафедра ММСА, Інститут прикладного системного аналізу,

e-mail: n.nedashkivska@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8277-3095>;

Геннадій Іванович Гайко¹,

д. т. н., проф., кафедра геoinженерії, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,

e-mail: gayko.kpi@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4263-5958>;

Володимир Стефанович Білецький²,

д. т. н., проф., кафедра видобування нафти, газу та конденсату,

²НТУ "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна,

e-mail: biletsk@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2936-9680>

Проаналізовані характерні екологічні та техногенні загрози міському середовищу. Розглянуто пріоритетні для безпеки людини і суспільства задачі мінімізації екологічних і техногенних ризиків в умовах швидко зростаючих мегаполісів. Оцінено можливості підземних споруд взяти на себе функції найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об'єктів і комунікацій. Побудовано моделі підтримки прийняття рішень для оцінювання альтернатив трас автомобільних тунелів у місті Києві. Розкрито методику й проведено оцінювання моделей розвитку підземної транспортної інфраструктури столиці методом BOCR (критерії доходів, можливостей, витрат і ризиків). Розглянуто задачу оцінювання пріоритетності моделей (альтернативних варіантів) розвитку підземної інфраструктури міста, яка характеризується умовами унікальності, можливої неповноти, неточності, нечіткості вхідної інформації. При цьому використано результати експертного оцінювання об'єктів. Розраховано агреговані за мережею параметрів пріоритети альтернатив для трас тунелів м. Києва і обґрунтовано доцільну послідовність їх будівництва за критеріями зниження екологічних і техногенних ризиків урбанізованого простору. Зокрема, застосування методу BOCR дозволило вибрати найбільш пріоритетну альтернативу – тунель №5 за Генеральним планом розвитку Києва до 2025 року. Метод є гнучким, за його допомогою можуть бути оцінені будь-які інші території (траси) потенційного підземного будівництва у великих містах. Отже, практичне значення роботи полягає в створенні й апробації універсальної методики, що дає інвесторам і міським державним адміністраціям ефективний інструментарій оцінки першочерговості будівництва об'єктів підземної інфраструктури для регулювання міського розвитку з метою підвищення екологічних стандартів і безпеки життєдіяльності мегаполісів.

Ключові слова: урбаністичний простір, підземна інфраструктура, екологічні ризики, техногенні ризики, системний аналіз.

Як цитувати: Панкратова Н. Д. Оцінювання екологічних ризиків розвитку підземної транспортної інфраструктури методом BOCR / Н. Д. Панкратова, Н. І. Недашківська, Г. І. Гайко, В. С. Білецький // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2021. – Вип. 55. – С. 130-143. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-21>

In cites: Pankratova N. D., Nedashkovskaya N. I., Naiko H. I., Biletskyi V. S. (2021). Assessment of environmental risks of underground transport infrastructure development by BOCR method. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (55), 130-143. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-21>

Вступ. Однією з характерних рис сучасності є стаке збільшення мегаполісів, розширення міської інфраструктури, зростання населення, різке збільшення кількості автомобілів, що призводить до значного ускладнення управління ризиками у великих містах. Найбільш характерними загрозами міському середовищу 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 [1-4]. Так, головною причиною серцево-судинних і онкологічних захворювань, ушкоджень органів дихання мешканців міст є викиди токсичних речовин автомобілів, а пов'язане з ними шумове забруднення є причиною розладу слухової й нервової систем, причому довготривалий вплив гучного шуму на людину призводить до зниження працездатності до 60% [5, 6]. Транспортні аварії створюють найбільші ризики травмування й загибелі містян у мирний час. Саме тому вирішення проблем міських транспортних

комунікацій, зокрема постійно зростаючої інтенсивності автомобільного руху в мегаполісах є одним з головних напрямків мінімізації екологічних і техногенних ризиків великих міст. Світові концепти екологізації міського середовища значну увагу приділяють можливостям підземного простору взяти на себе функції найбільш небезпечних та ризикованих поверхневих об'єктів і комунікацій, оскільки вплив будь-якого підземного об'єкту на навколишнє середовище значно нижчий, порівняно з подібним на поверхні, й кращою мірою може контролюватися [7-10]. При цьому планування розвитку підземної транспортної інфраструктури повинно спиратися на системну методологію та інструментарій аналізу складних систем [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження розвитку транспортних систем великих міст з точки зору мінімізації екологічних та техногенних ризиків залишаються в центрі уваги багатьох дослідників [3, 4, 6, 12 та ін.], проте більшість з них зосереджені на традиційних підходах щодо вдосконалення організації наземного транспорту (обмеження його міського функціонування) та екологізації автомобілів. Серед публікацій останніх років, присвячених освоєнню підземного простору мегаполісів, є обґрунтування екологізованих автомобільних тунелів, які здатні істотно знизити екологічні та техногенні небезпеки (вихлопні гази з тунелю можна відвести та утилізувати, як це роблять, наприклад, у скандинавських країнах) [10, 13-15]. Проте лише системний комплексний підхід до розвитку підземної інфраструктури може забезпечити якісне покращення екології та безпеки урбанізованого простору. Методи системного аналізу, які застосовувались до поверхневого містобудівництва [16, 17] не можуть бути прямо перенесені на підземний простір, оскільки визначальну роль тут має геологічне середовище, доступ через підземні виробки, принципово інша просторова організація тощо. Перша ґрунтова робота щодо застосування системної методології для аналізу розвитку підземної урбаністики [11] зосереджувалась на проблемі прогнозування оцінки сприятливості геологічного середовища будівництву підземних комплексів. Проте питання мінімізації екологічних і техногенних ризиків при плануванні підземної інфраструктури, пріоритетність і раціональна черговість будівництва підземних транспортних об'єктів залишалися недостатньо дослідженими.

Мета роботи полягає в застосуванні системного інструментарію (метод ВОСР – критерії доходів, можливостей, витрат і ризиків) для планування підземної транспортної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації екологічних і техногенних ризиків урбаністичного простору та виділення пріоритетів (першочерговості) будівництва автомобільних тунелів (на прикладі Генерального плану міста Києва).

тору та виділення пріоритетів (першочерговості) будівництва автомобільних тунелів (на прикладі Генерального плану міста Києва).

Методика ВОСР для оцінювання альтернатив пріоритетності моделей. Для державних і міських адміністрацій в умовах обмеженості бюджету постає задача оцінювання важливості, пріоритетності моделей альтернативних варіантів розвитку підземної інфраструктури міста для подальшого вибору об'єктів для першочергової реалізації. Це завдання стосується слабо структурованих задач підтримки прийняття рішень. Їх особливості, як відомо, полягають у відсутності строго формалізованої цілі функціонування об'єкту керування і, відповідно, оптимального розв'язку в класичному розумінні, а також відсутності детермінованої інформації в обсязі, необхідному для отримання розв'язку.

Задача оцінювання важливості, пріоритетності моделей (альтернативних варіантів) розвитку підземної інфраструктури міста характеризується унікальністю, неповнотою, неточністю, нечіткістю вхідної інформації. Для її вирішення можуть застосовуватися математичні методи аналізу ієрархій, вхідна інформація для яких – це кількісні дані та якісні оцінки експертів. У [18 – 22] запропоновано складові методології та інструментарію підтримки прийняття рішень для розрахунку пріоритетів альтернатив на основі ієрархічних та мережових моделей критеріїв. Методи ієрархічних моделей підтримки прийняття рішень та оцінок експертів використовують для розв'язання задач сталого розвитку міських територій [23, 24], для планування мегаполісів та підземного будівництва [25, 26]. Напрацювання авторів робіт [23 – 26], однак, мають обмеження, серед яких: недостатньо обґрунтовано рівень узгодженості, не реалізовано оцінювання і підвищення узгодженості оцінок експертів; недостатньо формалізовано розв'язки на основі нечітких експертних оцінок; недостатньо проводиться аналіз чутливості та стійкості отриманих розв'язків. Вказаних обмежень не має розроблений модифікований метод ВОСР до оцінювання альтернатив рішень з урахуванням доходів, витрат, можливостей та ризиків [20].

Розглянемо як ці методи та інструментарій можуть бути застосовані до вирішення задачі оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Використовуючи матеріали Генерального плану розвитку Києва до 2025 р. [27], оцінки, надані вітчизняними експертами, та досвід зарубіжних країн, будується мережа підтримки прийняття рішень, на основі якої на наступному етапі виконується оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури мі-

ста Києва.

Мережа підтримки прийняття рішень (ППР) містить наступні елементи [20]:

$$S = \{V, L, E, PCM\},$$

- V – множина вершин графу $V = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ – це множина кластерів $C_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in_i}\}$, де кластери містять окремі елементи задачі ППР. Наприклад, один з кластерів містить альтернативні варіанти рішень – тунелі, інші кластери містять характеристики та параметри альтернатив, за якими відбувається їх оцінювання, а також чинники, які впливають на вибір тієї чи іншої альтернативи. В подальшому ці характеристики називатимуться критеріями рішень.

- L – множина направлених ребер графу. В мережі є зв'язки двох типів: зовнішні залежності між елементами різних кластерів показують, що елементи одного кластеру впливають на елементи іншого; внутрішні залежності – петлі в графі – показують взаємний вплив між елементами одного кластеру.

- E – множина оцінок елементів графу, наданих експертом в шкалі.

- PCM – множина обернено симетричних матриць парних порівнянь елементів графу, які будуються на основі експертних оцінок з множини E .

Часто до мережі ППР включають критерії доходів, можливостей, витрат та ризиків, скорочено BOCR, від реалізації досліджуваних альтернатив. Під час порівняння альтернатив рішень відносно доходів і можливостей визначається, яка з альтернатив принесе більший дохід або має більше можливостей. При порівнянні альтернатив рішень відносно витрат і ризиків питання ставиться відносно того, яка з альтернатив є більш витратною або ризикованою. На практиці найчастіше використовують мережі BOCR ППР, які містять складові, наведені на рис. 1, 2.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розглянемо застосування модифікованого методу BOCR до оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Особливості методу в тому, що агреговані пріоритети альтернатив рішень (тунелів) розраховуються за мережею підтримки прийняття рішень з урахуванням факторів ризиків на основі експертних оцінок парних порівнянь; є можливість підвищити узгодженість оцінок експерта щодо елементів мережі без участі експерта; є можливість комплексно оцінити чутливість розв'язків, отриманих на кожному етапі методу. В результаті розраховуються агреговані за множиною параметрів пріоритети альтернатив тунелів і вибираються найбільш пріоритетні з них для першочергової реалізації.

Етапи модифікованого методу BOCR описано в [20]. Вхідні дані для цього методу – оцінки, отримані від експерта і представлені обернено симетричними матрицями парних порівнянь (МПП) $D_{n \times n} = \{(d_{ij})\}$, $d_{ij} > 0$, $d_{ji} = 1/d_{ij}$ елементів мережі. Розглянемо, як виконується аналіз якості чітких МПП. В [18] запропоновано спосіб підвищення узгодженості чітких МПП D без участі експерта. Розглянемо його за умови, що узгодженість оцінюється за показником CI^{tr} :

1. Задати значення параметра α , $0 < \alpha < 1$. Обчислити показник узгодженості CI^{tr} МПП D .

2. В циклі, поки не виконується критерій допустимості неузгодженості $CI^{tr} > CI^{tr \text{ порог}}$:

- 2.1. Обчислити ваги $w = (w_1, \dots, w_n)^T$ на основі МПП D .

- 2.2 Обчислити скориговану МПП $D^* = (d_{ij}^*)$, використовуючи наведені нижче мультиплікативне або адитивне коригування.

- 2.3 Обчислити значення показника CI^{tr} скоригованої МПП D^* . Виконати присвоєння $D := D^*$.

Мультиплікативне коригування МПП базується на наступному твердженні, яке сформульовано і доведено в [19]. Нехай $D_{n \times n}^* = (d_{ij}^*)$, $d_{ij}^* = (d_{ij})^\alpha (\frac{w_i}{w_j})^{1-\alpha}$ – скоригована МПП, де $\alpha \in (0,1)$ – параметр коригування. Тоді $CI^{tr*} \leq CI^{tr}$, де CI^{tr*} – індекс узгодженості транзитивностей скоригованої МПП $D_{n \times n}^*$; CI^{tr} – індекс узгодженості початкової МПП $D_{n \times n}$; рівність $CI^{tr*} = CI^{tr}$ виконується тоді і тільки тоді, коли $D_{n \times n}$ узгоджена.

Адитивне коригування базується на аналогічному твердженні, що було доведено в [19], де скоригована МПП $D_{n \times n}^* = (d_{ij}^*)$ розраховується $d_{ij}^* = \alpha d_{ij} + (1 - \alpha) (\frac{w_i}{w_j})$, якщо $i < j$ і $d_{ij}^* = (\alpha d_{ji} + (1 - \alpha) (\frac{w_j}{w_i}))^{-1}$ для випадку $i \geq j$.

Нехай оцінки формалізуються за допомогою нечіткої матриці парних порівнянь (НМПП) $\tilde{D} = \{(\tilde{d}_{ij}) | i, j = 1, \dots, n\}$, де $\tilde{d}_{ij} = (x, \mu_{ij}(x))$ – нечітка множина, що відображає інтенсивність переваги альтернативи a_i над альтернативою a_j , $x \in R$, $\mu_{ij}(x)$ – значення функції приналежності для нечіткого відношення переваги a_i над a_j , $\tilde{d}_{ii} = 1$. Оцінювання і підвищення узгодженості НМПП виконується за методом [21]:

1. Побудувати дефазифіковану МПП $D = \{(d_{ij})\} \in R_{n \times n}^+$, де $d_{ij} = Defuz(\tilde{d}_{ij})$, якщо $\tilde{d}_{ij} \geq 1$ і $d_{ij} = 1/d_{ji}$ інакше, $i, j = 1, \dots, n$.

2. Виконати оцінювання і підвищення узгодженості МПП D , використовуючи метод, запропонований вище для чіткої МПП.

Переваги описаного методу, порівняно з іншими існуючими, наступні:

- стає можливим визначити слабку узгодженість НМПП та оцінити допустимість неузго-

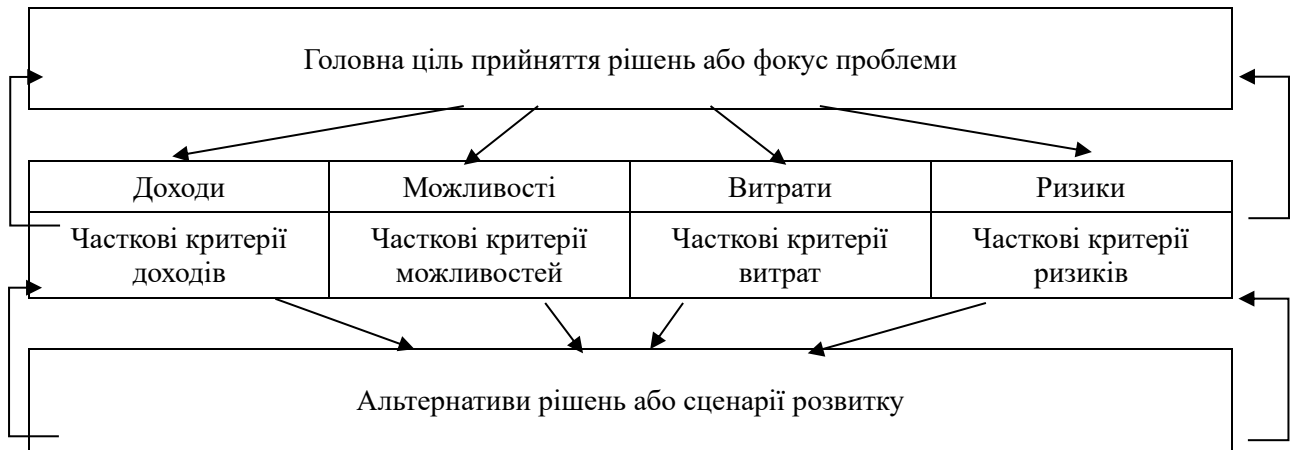


Рис. 1. Перший варіант мережі ППР оцінювання альтернатив рішень з урахуванням ризиків.
Fig. 1. The first version of the BOCR network to evaluate risk-based alternatives

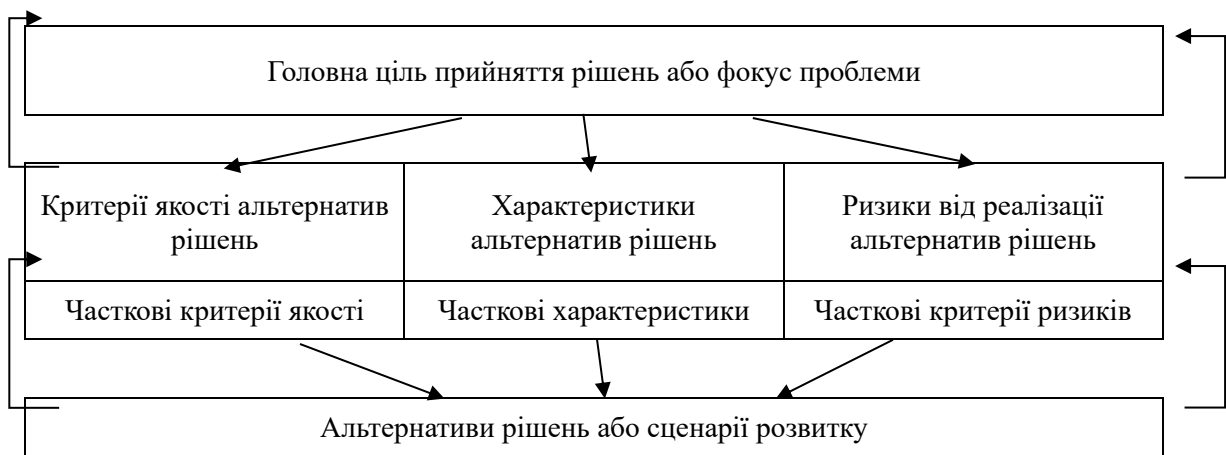


Рис. 2. Другий варіант мережі ППР з урахуванням ризиків.
Fig. 2. The second version of the BOCR network, taking into account the risks

дженості НМПП для обчислення ваг,

- відносно легко реалізується підвищення узгодженості НМПП, знаходження найбільш не узгоджених елементів і циклів в НМПП, використовуючи апарат, розроблений для чітких МПП,
- не виникає протиріч між результатами за чіткою і відповідною їй нечіткою МПП, на відміну від відомих методів, які використовують розширені бінарні арифметичні операції; зокрема, не виникає протиріч в окремому випадку $n=2$,
- застосовується до НМПП з будь-якими типами елементів (трапецевидними, гаусівськими, а також дискретними нечіткими множинами).

В результаті для всіх елементів мережі, альтернатив тунелів та параметрів тунелів отримаємо МПП прийнятної якості, які можна використовувати на наступному етапі модифікованого методу BOCR.

Перейдемо до розгляду методу знаходження агрегованих пріоритетів елементів мережі BOCR [20]. Будується зважена блочна матриця $WWE = \{(WWE_{ji})\}$ локальних пріоритетів елементів всіх кластерів мережі, де $WWE_{ji} = WE_{ji} \cdot WC_{ji}$,

$WE_{ji} \geq 0$ – матриця нормованих локальних пріоритетів елементів кластера C_j відносно елементів кластера C_i , WC_{ji} – матриця нормованих ваг кластера C_j відносно кластера C_i , $j, i = 1, \dots, N$. Якщо $I(C_i, C_j) = 0$, то WE_{ji} – нульова матриця. Матриця $WWE \geq 0$ стохастична за побудовою. На основі WWE розраховуються граничні пріоритети елементів мережі:

- якщо WWE – примітивна, то шукані пріоритети w – елементи головного власного вектору матриці WWE ;

- якщо WWE – неприводима, імпримітивна (циклічна), то шуканий вектор пріоритетів – це середнє значення стовбців матриці WWE^k при $k \rightarrow \infty$;

Агреговане значення пріоритету i -ї альтернативи за моделлю кластерів доходів, витрат, можливостей і ризиків (рис.1) здійснюється за одним з правил:

$$w_i^{aggr} = (B \cdot O) / (C \cdot R) \text{ або}$$

$$w_i^{aggr} = bB + oO + \frac{c}{C} + \frac{r}{R}$$

$$\text{або } w_i^{aggr} = bB + oO + (1 - c)C + (1 - r)R,$$

де b, c, o, r – ваги якостей доходів, витрат, можливостей та ризиків, B, C, O, R – значення локальних пріоритетів i -ї альтернативи за цими якостями.

Аналогічно, агрегований пріоритет i -ї альтернативи за моделлю на рис.2 – за одним з наступних правил:

$$w_i^{aggr} = (Q \cdot H) / R \text{ або}$$

$$w_i^{aggr} = qQ + hH + r/R$$

$$\text{або } w_i^{aggr} = qQ + hH + (1 - r)R,$$

де q, h – ваги якостей, характеристик альтернатив рішень, r – вага критерію ризиків від реалізації альтернатив, Q, H, R – значення локальних пріоритетів i -ї альтернативи за визначеними якостями, характеристиками та ризиками.

Розглянемо застосування методу BOCR до оцінювання альтернатив трас тунелів у місті Києві. Використовуючи оцінки, надані вітчизняними експертами, та досвід зарубіжних країн, побудовано мережеву модель підтримки прийняття рішень для оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві, причому як альтернативи рішень розглянуто два варіанти тунелів, а саме, тунель 1 і частина тунелю 5 (до Дніпра), які відображають типові умови середмістя (рис. 3).

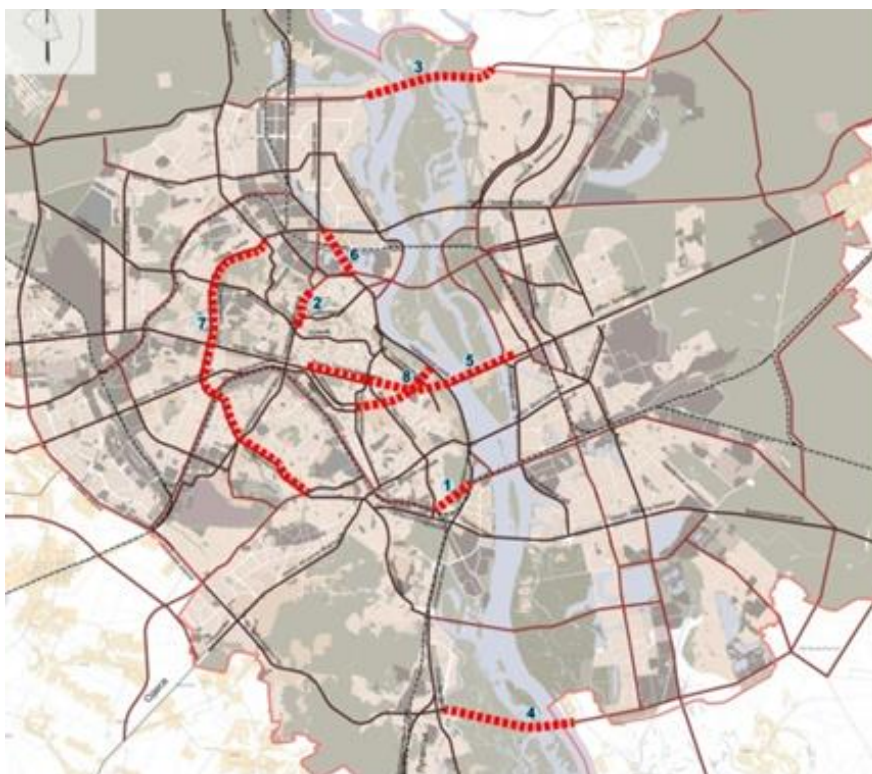


Рис. 3. Схема трасування автомобільних тунелів (Генеральний план розвитку Києва до 2025 р.).
Fig. 3. Scheme of route of road tunnels (General plan of development of Kiev till 2025)

Для оцінювання цих альтернатив тунелів у модель включено наступні основні критерії рішень (Рис. 4):

1. Геологічне середовище по трасі тунелів.
2. Характеристики ділянки будівництва.
3. Структурно-функціональні (доцільність будівництва тунелю) і екологічно-безпекові чинники.
4. Чинники ризику.

Параметри, які характеризують геологічне середовище по трасі тунелів, в свою чергу, деталізуються на підкритерії рішень:

- 1.1. Рівень динамічного навантаження.

- 1.2. Показник статичного навантаження від поверхневої забудови.

- 1.3. Показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву.

- 1.4. Вплив існуючих підземних об'єктів.

- 1.5. Генетичний тип та літологічний склад ґрунтів.

- 1.6. Розрахунковий опір ґрунту.

- 1.7. Вплив водоносних горизонтів і верховодки.

- 1.8. Тип рельєфу і морфометрія.

- 1.9. Інженерно-геологічні процеси.

- 1.10. Геотехнології будівництва підземних споруд.

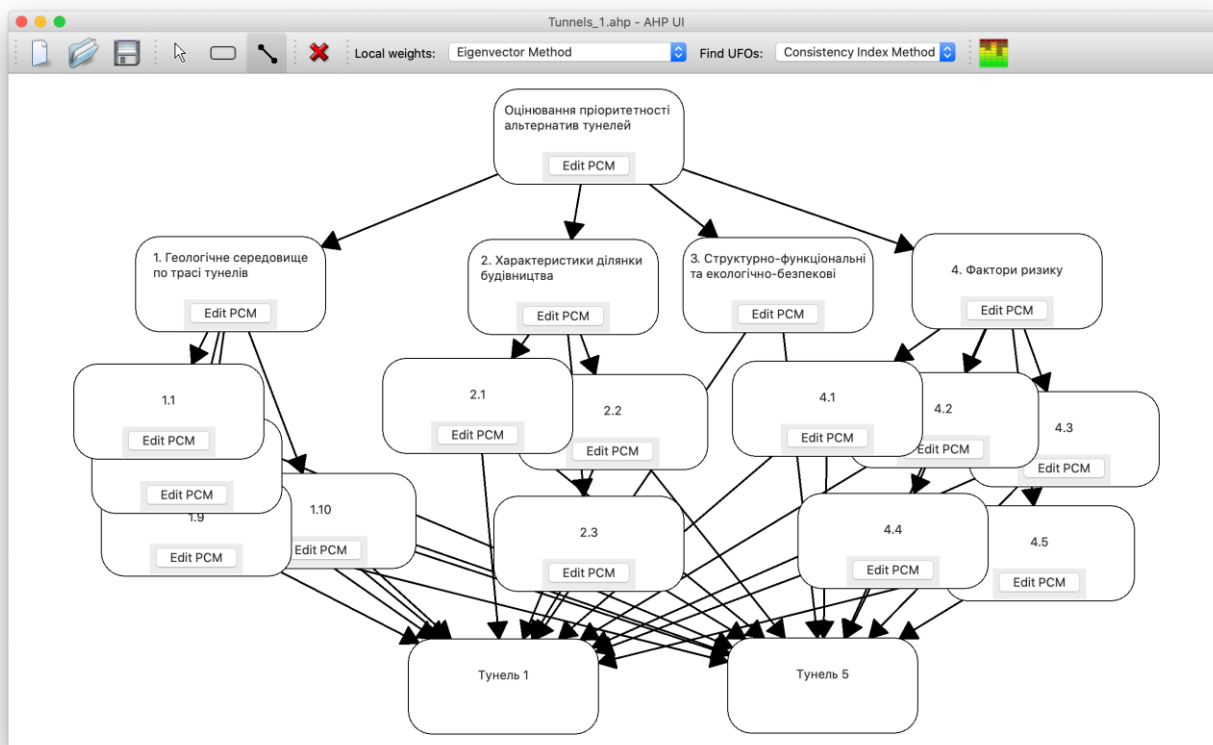


Рис. 4. Модель підтримки прийняття рішень для оцінювання альтернатив тунелів у місті Києві.
 Fig. 4. Decision support model for evaluating tunnel alternatives in Kyiv

У мережі рішень враховуються наступні характеристики ділянки будівництва:

- 2.1. Придатність ділянки.
- 2.2. Масштаб об'єкта.
- 2.3. Рівень забудови.

Фактори ризику деталізуються наступним чином:

- 4.1. Ризики, пов'язані з ділянкою будівництва.
- 4.2. Забруднення повітря.
- 4.3. Шум і динамічні впливи.
- 4.4. Дорожні затори.
- 4.5. Дорожні аварії.

Для оцінювання моделі наведеної на рис.4, експерт використовує метод парних порівнянь об'єктів та шкалу Сааті 1 – 9. Критерій «1.Геологічне середовище по трасі тунелів» виявився більш важливим за всі інші: він сильно переважає критерій «2.Характеристики ділянки будівництва» та слабо переважає критерій «4.Фактори ризику» (рис. 5 і рис. 6). Результуюча МПП на основі цих оцінок (рис. 7) допустимо неузгоджена, про що свідчить значення індексу неузгодженості рівне 0,039, менше за відповідне порогове значення для МПП даної розмірності. Ця МПП також має додаткову бажану властивість слабкої узгодженості і, як наслідок, не містить циклів, які призводять до нетранзитивних результуючих ранжувань. На рис. 6 і рис. 8 наведено розраховані значення локальних пріоритетів або ваг відповід-

них елементів мережі.

На рис. 9 показано множину оцінок з викидом – це елемент $a[2,1] = 5$, що відмічено кольором. Викид призвів до високого рівня неузгодженості всієї множини оцінок, оскільки значення індексу неузгодженості МПП зросло до 0,344. МПП на рис. 9 є суперечливою, не допускає узгодженості й не може використовуватися для подальших розрахунків. Оберемо інструментарій «Improve Consistency» у вікні на рис. 10. У результаті система автоматично знаходить найбільш неузгоджені експертні оцінки, викиди та пропонує для них більш прийнятні значення (рис. 11). Остаточне рішення щодо коригування МПП приймає людина – аналітик або ОПР. Система також передбачає можливість ручного коригування оцінок за результатами діалогу з експертом, використовуючи форми, наведені на рис. рис. 5 і рис. 7. Таким чином, система підтримки прийняття рішень виконує аналіз даних, отриманих від експерта стосовно всіх елементів мережі, визначає рівень узгодженості оцінок, придатність оцінок для подальшого використання, а також включає інструментарій коригування даних з або без участі експерта з метою підвищення рівня їх узгодженості.

У даній задачі отримано наступні пріоритети критеріїв рішень: «С1. Геологічне середовище по трасі тунелів» (0,433), «С2. Характеристики ділянки будівництва» (0,125), «С3. Структурно-функціональні і екологічно-безпекові фактори» (0,350),



Рис. 5. Оцінки експертів щодо критеріїв рішень, виконані у прийнятій шкалі.
 Fig. 5. Expert assessments of the decision criteria performed in the adopted scale

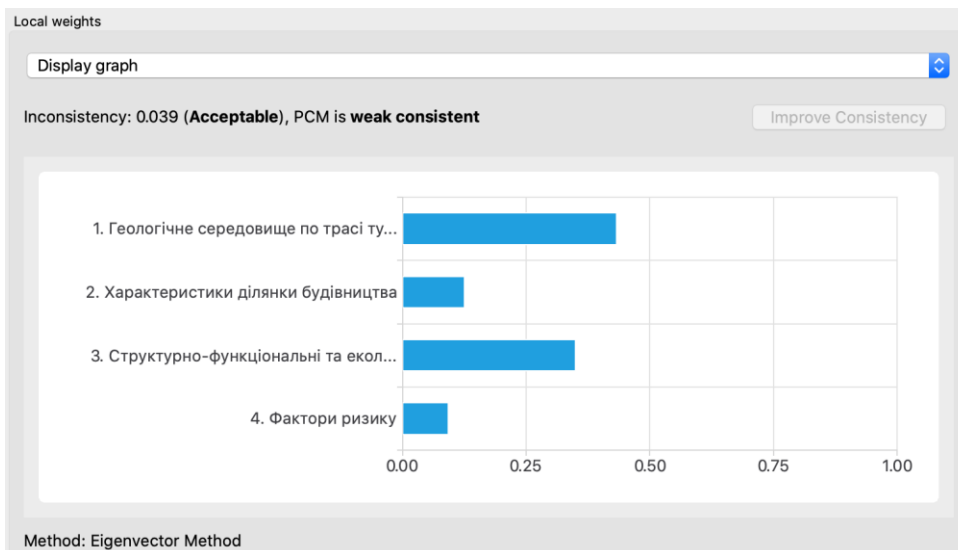


Рис. 6. Результати експертного оцінювання: локальні ваги критеріїв рішень на основі заданих оцінок.
 Fig. 6. Results of expert evaluation: local weights of decision criteria based on given evaluations

Pairwise comparison

Matrix input

2. Характеристики ділянки будівництва is 2.000 times more preferable than 4. Фактори ризику

	1. Геологічне середовище по трасі тунелів	2. Характеристики ділянки будівництва	3. Структурно-функціональні та екологічно-безпекові	4. Фактори ризику
1. Геологічне середовище по трасі тунелів	1.0	5.0	1.0	4.0
2. Характеристики ділянки будівництва	0.2	1.0	0.3333333333333333	2
3. Структурно-функціональні та екологічно-безпекові	1.0	3	1.0	3
4. Фактори ризику	0.25	0.5	0.3333333333333333	1.0

Рис. 7. МПП експертного оцінювання критеріїв рішень відносно головної цілі.
 Fig. 7. BOCR expert evaluation of decision criteria in relation to the main goal

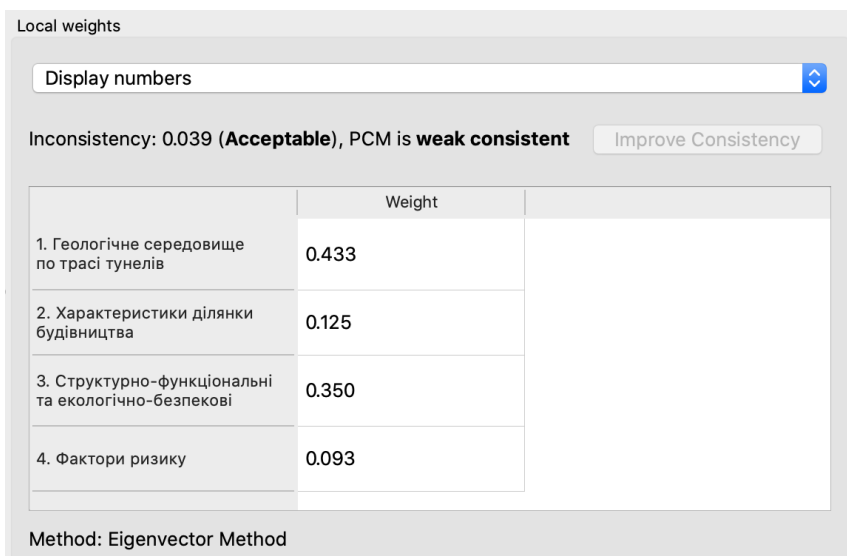


Рис. 8. Результати експертного оцінювання: локальні ваги критеріїв рішень на основі заданої МПП.
 Fig. 8. Results of expert evaluation: local weights of decision criteria based on a given BOCR

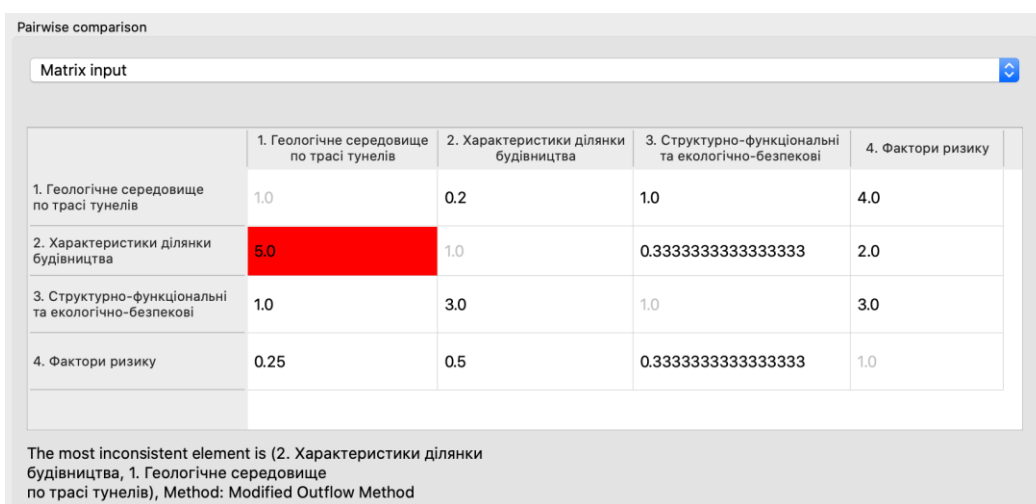


Рис. 9. Приклад сильно неузгодженої МПП критеріїв рішень.
 Fig. 9. Example of a highly inconsistent BOCR decision criteria

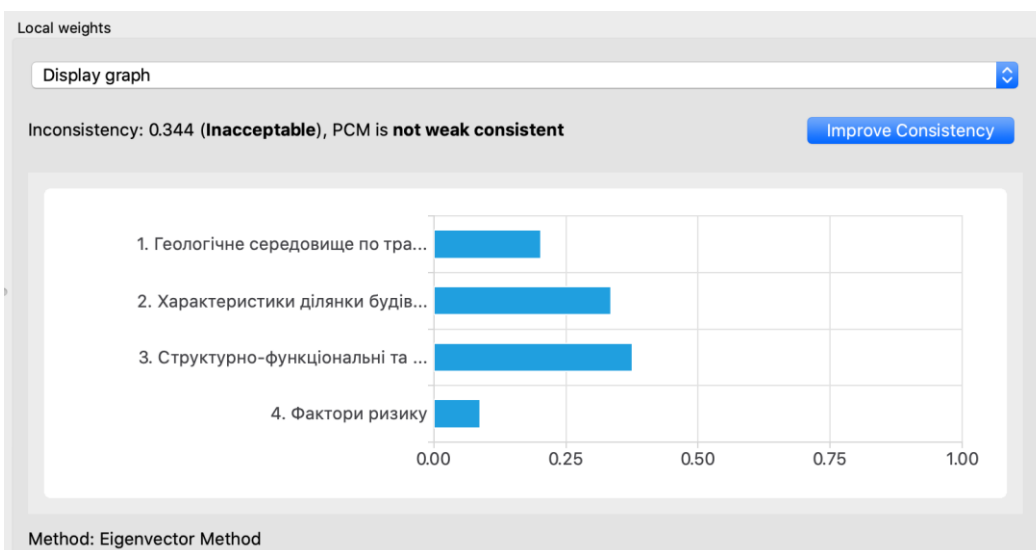


Рис. 10. Застосування методу оцінювання і підвищення узгодженості до сильно неузгодженої МПП критеріїв рішень.
 Fig. 10. Applying the method of evaluation and increasing consistency to a highly inconsistent BOCR decision criteria

Improved PCM

	1. Геологічне середовище по трасі тунелів	2. Характеристики ділянки будівництва	3. Структурно-функціональні та екологічно-безпекові	4. Фактори ризику
1. Геологічне середовище по трасі тунелів	1.000	3.000	1.000	4.000
2. Характеристики ділянки будівництва	0.333	1.000	0.333	2.000
3. Структурно-функціональні та екологічно-безпекові	1.000	3.000	1.000	3.000
4. Фактори ризику	0.250	0.500	0.333	1.000

Рис. 11. Скоригована без участі експерта МПП критеріїв рішень.
 Fig. 11. Adjusted decision criterion without the participation of the BOCR expert

«С4. Фактори ризику» (0,093), та ранжування критеріїв на їх основі:

$$C1 > C3 > C2 > C4.$$

Чутливість отриманого ранжування до збурень у початкових даних – оцінках експерта – можна виконати, використовуючи інструментарій

«Sensitivity Analysis». Система підтримки прийняття рішень для кожного елемента МПП розраховує інтервали та індекси стійкості щодо збереження узгодженості (рис. 12а) та інтервали та індекси стійкості щодо збереження ранжування (рис. 12б).

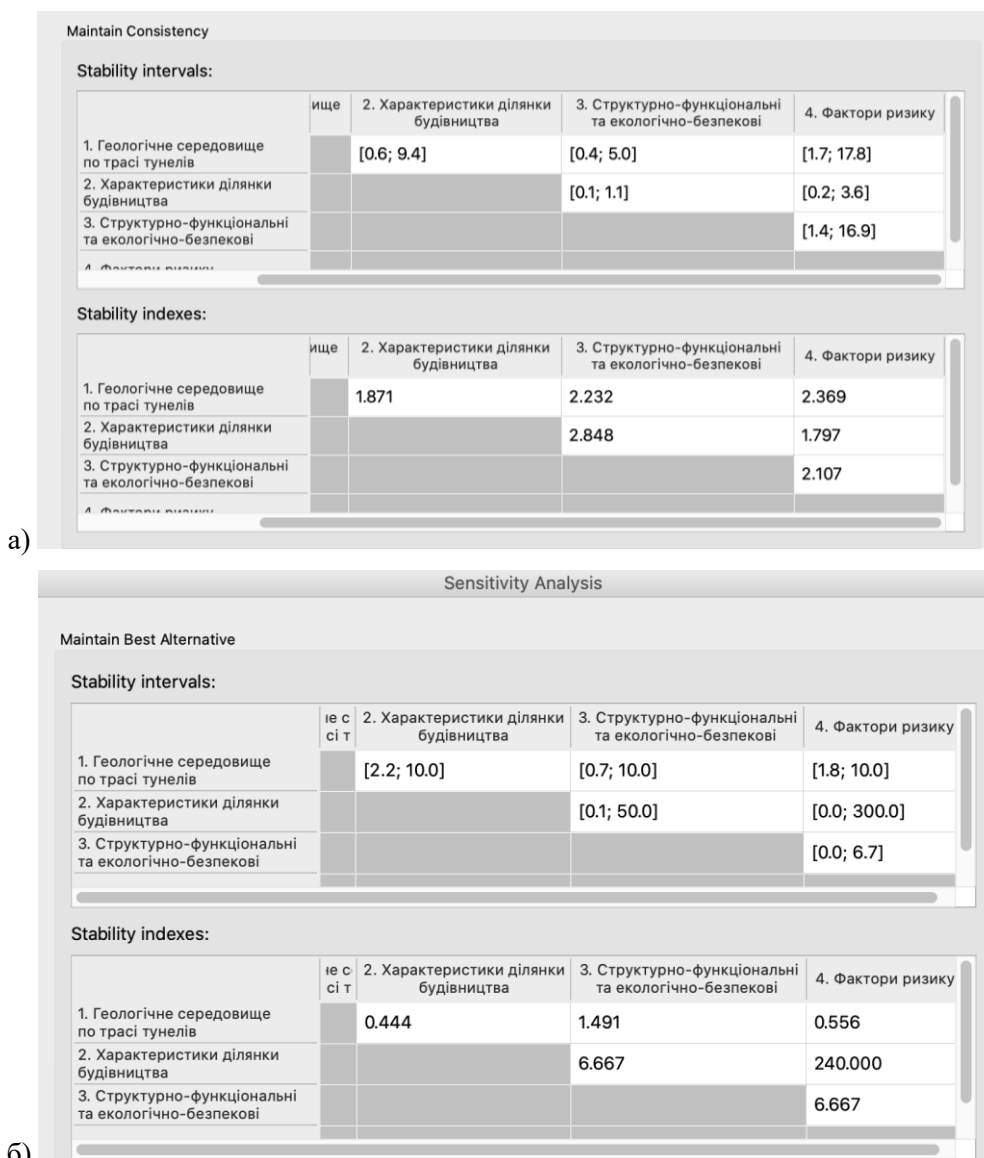


Рис. 12. Оцінювання чутливості ранжування критеріїв рішень.
 Fig. 12. Evaluation of the sensitivity of ranking decision criteria

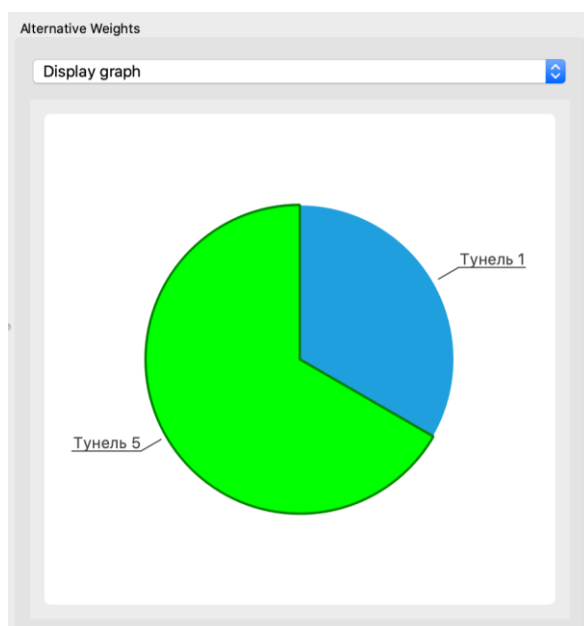


Рис. 13. Агреговані пріоритети альтернатив тунелів на основі тестових експертних оцінок.
Fig. 13. Aggregate priorities of tunnel alternatives based on test expert assessments

Причому, перші інтервали – ті, в межах яких можуть змінюватися обрані оцінки, щоб узгодженість всієї МПП залишалася допустимою. Другі інтервали – в межах яких можуть змінюватися обрані оцінки так, щоб найкращий елемент або все результуюче ранжування залишалися незмінними. *Індекс стійкості* для елементу (i, j) МПП визначається [22]

$$\delta_{ij} = \min(\underline{SInt}_{ij}^{-1}, \overline{SInt}_{ij}),$$

де $\underline{SInt}_{ij}, \overline{SInt}_{ij}$ – лівий і правий кінці інтервалу стійкості.

Так, найбільш чутливим до зміни рівня узгодженості МПП критеріїв рішень є елемент $a[2,4]=2$ в МПП на рис. 7, оскільки він характеризується найменшим значенням індексу стійкості рівним 1,797 у відповідній матриці на рис.12а. В свою чергу, найбільш стійкий до зміни рівня узгодженості МПП критеріїв рішень – це елемент $a[2,3]=0,333$ в МПП на рис. 7, так як йому відповідає максимальне значення індексу стійкості рівне 2,848 на рис. 12а.

Найбільш стійким до зміни отриманого ранжування $C1 > C3 > C2 > C4$ критеріїв рішень виявився елемент $a[2,4]$ МПП (рис. 7) із максимальним значенням індексу стійкості рівним 240 у матриці на рис. 12б.

Система розраховує локальні ваги усіх елементів мережі, представленої на рис.4, і результати можна переглянути у вікнах, аналогічних до наведених на рис. 5 – 8.

Результат розрахунку мережі, відображеної на рис.4 – це агреговані пріоритети критеріїв, підкритеріїв, ризиків і альтернатив варіантів тунелів

з урахуванням всіх зазначених зв'язків. Результуючі агреговані пріоритети двох альтернатив тунелів наведено на рис. 13. Діаграма наглядно демонструє пріоритетність будівництва тунелю №5, який значно більшою мірою впливає на мінімізацію екологічних і техногенних ризиків.

Висновки. Розглянуто застосування модифікованого методу BOCR до оцінювання пріоритетності моделей (альтернатив) розвитку підземної інфраструктури міста Києва. Особливості методу полягають у тому, що агреговані пріоритети альтернатив рішень щодо тунелів розраховуються за мережею підтримки прийняття рішень з урахуванням факторів доходів, витрат, можливостей і ризиків на основі експертних оцінок парних порівнянь; є можливість підвищити узгодженість оцінок експерта щодо елементів мережі за участю та без участі експерта; є можливість комплексно оцінити чутливість розв'язків, отриманих на кожному етапі методу. Створені моделі трас двох тунелів пройшли тестування за методом BOCR, що дозволило вибрати за критерієм мінімізації екологічних і техногенних ризиків найбільш пріоритетну альтернативу – тунель №5 за Генеральним планом розвитку Києва до 2025 р. Метод є гнучким, за його допомогою можуть бути оцінені будь-які інші території (траси) потенційного підземного будівництва у великих містах. Це дає інвесторам, міським державним адміністраціям та суспільним організаціям ефективний інструментарій оцінки першочерговості будівництва об'єктів підземної урбаністики для регулювання міського розвитку з метою підвищення екологічних стандартів і безпеки життєдіяльності мегаполісів.

Список використаної літератури

1. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. United Nations. New York, 2019.
2. *Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва за 2017 рік*. – Київ: КМДА, 2018. – 128 с.
3. Климчик О.М., Багмет А.П., Данкевич Є.М., Матковська С.І. *Екологія міських систем*. – Житомир: : Видавець О.О. Євенок, 2016. – 460 с.
4. Корендясева Е.В. *Экологические аспекты управления городом*. М.: МГУУ Правительства Москвы, 2017. – 162 с.
5. *Экология города : учебн. / под ред. Ф. В. Стольберга*. – К. : Либра, 2000. – 464 с.
6. Препотенська М. *Ното Urbanus: феномен людини мегалопісу*. – Дніпропетровськ: Вид. Середняк Т.К., 2014. – 420 с.
7. Голубев Г. Е. *Подземная урбанистика и город*. М.: МИКХиС, 2005.
8. Gilbert P.H. et al., *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington: The National Academies Press, 2013.
9. Картозия Б.А. *Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции*// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 615 – 629.
10. Гайко Г.І., Матвійчук І.О., Білецький В.С., Салуга П. *Методи прогновної оцінки сприятливості геологічного середовища будівництву об'єктів підземної урбаністики*/ Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". 2018. – № 48. – С. 39 – 51.
11. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проектних конфігурацій*. – К.: Наукова думка, 2020. – 134 с.
12. Безлюбченко О.С., Гордієнко С.М., Завальний О.В. *Планування міст і транспорт*. – Харків : ХНАМГ, 2008. – 156 с.
13. Гайко Г.І., Булгаков В.П., та Сіверин М.О. *Система автомобільних тунелів як спосіб розв'язання транспортних і екологічних проблем мегалопісу*// Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія «Гірництво»: Збірник наукових праць, вип. 30, 2016. - С. 196–206.
14. Vähäaho I. *Underground space planning in Helsinki*// *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. № 6.
15. Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, X. Shi, and T. Hanamura. *Sustainability issues for underground spaces in urban areas*. *Proceedings of ICE*. – *Urban Design and Planning*. Volume 165, Issue 4. – December 2012, – P. 241–254.
16. Ресин В.И., Попков Ю.С. *Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход*. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 328 с.
17. Попков Ю.В., Посохин М.В., Гутнов А.Э., Шмудьян Б.А. *Системный анализ и проблемы развития городов*. – М.: Наука, 1983. – 368 с.
18. Недашківська Н.І. *Системний підхід до підтримання прийняття рішень на основі ієрархічних та мережеских моделей. Системні дослідження та інформаційні технології*. 2018. №1. С.7 – 18.
19. Nedashkivska N.I. *A method of consistent pairwise comparisons for decision alternatives evaluation in terms of a qualitative criterion*// *System research and information technologies*. – 2013. – Vol.4. – P.67 – 79. (in ukrainian)
20. Nataliya D. Pankratova., Nadezhda I.Nedashkovskaya. *Evaluation of Ecology Projects for Black Sea Odessa Region on Basis of a Network BOCR Criteria Model* // 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), October 2018.
21. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. *Estimation of Consistency of Fuzzy Pairwise Comparison Matrices using a Defuzzification Method*. V.A. Sadovnichiy and M.Z. Zgurovsky (eds.), *Advances in Dynamical Systems and Control, Studies in Systems, Decision and Control*. 2016. Vol. 69, P.375-386. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40673-2_20.
22. Недашківська Н.І. *Оцінювання стійкості локальних ваг альтернатив рішень на основі методу парних порівнянь. Системні дослідження та інформаційні технології*. 2016. №4. С.14 – 22.
23. A.Nesticò, C.Elia, V.Naddeo. *Sustainability of urban regeneration projects: Novel selection model based on analytic network process and zero-one goal programming*. *Land Use Policy*, Vol. 99, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104831>.
24. R.F.Mohammed Ameen, M.Mourshed. *Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process*, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 44, 2019, Pages 356-366.
25. Michael R.Doyle. *Mapping urban underground potential in Dakar, Senegal: From the analytic hierarchy process to self-organizing maps*, *Underground Space*, Vol. 5, Is. 3, 2020, pp.267-280, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.04.004>.
26. Jian Peng, Fang-Le Peng. *A GIS-based evaluation method of underground space resources for urban spatial planning: Part 1 methodology, Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 74, 2018, Pages 82-95, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.002>.
27. *Генеральний план розвитку м. Києва та його приміської зони до 2025 року (проект)*. Режим доступу: <https://kga.gov.ua/generalnij-plan>.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Оценка экологических рисков развития подземной транспортной инфраструктуры методом БОСР

Наталья Дмитриевна Панкратова¹,

д. т. н., проф., член-корр. НАНУ, заместитель директора по научной работе Института прикладного системного анализа, ¹НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина;

Надежда Ивановна Недашковская¹,

д.т.н., доцент, кафедра ММСА, Институт прикладного системного анализа;

Геннадий Иванович Гайко¹,

д. т. н., проф., кафедра геоинженерии, Институт энергосбережения и энергоменеджмента;

Владимир Стефанович Белецкий²,

д. т. н., проф., кафедра добычи нефти, газа и конденсата,

²НТУ «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 21, г. Харьков, 61002, Украина

Проанализированы характерные экологические и техногенные угрозы городской среде. Рассмотрены приоритетные для безопасности человека и общества задачи минимизации экологических и техногенных рисков в условиях быстро растущих мегаполисов. Оценены возможности подземных сооружений, взять на себя функции наиболее опасных и рискованных поверхностных объектов и коммуникаций. Построены модели поддержки принятия решений для оценки альтернатив трасс автомобильных тоннелей в Киеве. Раскрыта методика и проведена оценка моделей развития подземной транспортной инфраструктуры столицы методом БОСР (критерии доходов, возможностей, расходов и рисков). Рассмотрена задача оценки приоритетности моделей (альтернативных вариантов) развития подземной инфраструктуры города, характеризующаяся условиями уникальности, возможной неполноты, неточности, нечеткости входящей информации. При этом использованы результаты экспертной оценки объектов. Рассчитаны агрегированные по сети параметров приоритеты альтернатив для трасс туннелей г. Киева и обоснована целесообразная последовательность их строительства по критериям снижения экологических и техногенных рисков урбанизированного пространства. В частности, применение метода БОСР позволило выбрать наиболее приоритетную альтернативу – тоннель №5 по Генеральному плану развития Киева до 2025 г. Метод является гибким, с его помощью могут быть оценены любые другие территории (трассы) потенциальных подземных построек в крупных городах. Таким образом, практическое значение работы заключается в создании и апробации универсальной методики, дающей инвесторам и городским государственным администрациям эффективный инструмент оценки первоочередности строительства объектов подземной инфраструктуры для регулирования городского развития с целью повышения экологических стандартов и безопасности жизнедеятельности мегаполисов.

Ключевые слова: урбанистическое пространство, подземная инфраструктура, экологические риски, техногенные риски, системный анализ.

Assessment of environmental risks of underground transport infrastructure development by BOCR method

Nataliya Pankratova¹,

DSc, Professor, Corresponding Member of NASU,

Institute for Applied System Analysis (IASA), Deputy Director of IASA for Research,

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

37 Peremogy Av., Kyiv, 03056, Ukraine;

Nadezhda Nedashkovskaya¹,

DSc, Associate Professor,

Hennadii Haiko¹,

DSc., Professor, Department of Geoengineering, Institute of Energy Saving and Energy Management;

Volodymyr Biletskyi²,

DSc., Professor,

Department of oil, gas and gas-condensate production,

²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21 Kirpichova, St., Kharkov, 61002, Ukraine

ABSTRACT

Formulation of the problem. Solving the problems of urban transport communications, in particular the constantly growing intensity of automobile traffic in megalopolises, is one of the main directions of minimizing the environmental and man-made risks of the urban environment. Global concepts of greening large cities pay considerable attention to the possibilities of underground space to take on the functions of the most dangerous and risky surface objects and

communications, since the impact of any underground object on the environment is much lower (than similar on the surface) and can be better controlled.

At the same time, planning for the development of underground transport infrastructure should be based on a systematic methodology and tools for analyzing complex systems.

Purpose. It consists in the use of system tools (BOCR method - criteria of benefits, opportunities, costs and risks) for planning underground transport infrastructure of large cities to ensure minimization of environmental and man-made risks of urban space and prioritization for the construction of road tunnels (for example, the General Plan of the Kiev city).

Methodology. A methodology and decision support toolkit for calculating the priorities of alternatives based on hierarchical and network criteria models are proposed. The modified BOCR method developed by the authors (N. Pankratova, N.I. Nedashkovskaya) was applied to assess decision alternatives taking into account benefits, costs, opportunities and risks.

Results. System models of two road tunnels, according to the General plan of the Kiev city until 2025 were developed. Assessment of the models using the BOCR method (criteria for benefits, opportunities, costs and risks) was performed. The priorities of alternatives for tunnels' routes aggregated over a network of parameters and a reasonably expedient sequence of their construction were calculated according to the criteria for reducing the environmental and man-made risks of the urbanized space.

Scientific novelty. For the first time, the target function of the system model for the development of underground infrastructure in large cities is to minimize the environmental and man-made risks of urban space. The capabilities of the modified BOCR method have been expanded and two alternative tunnel track models have been successfully tested.

Practical significance. The research methods and results provide investors, city state administrations and public organizations with an effective toolkit for assessing the priority of the construction of underground urban facilities to regulate urban development in order to improve environmental standards and the safety of life in megacities.

Keywords: *urban space, underground infrastructure, environmental risks, technogenic risks, system analysis.*

References

1. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights. United Nations. New York, 2019. Available at: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>*
2. *Regional report on the state of the environment of Kyiv for 2017. Kyiv City State Administration. Available at: <https://mepr.gov.ua/files/docs/%D0%9C.%20%D0%9A%D0%98%D0%87%D0%92.pdf>*
3. *Klymchuk, O.M., Bahmet, A.P., Dankevych, YE.M., Matkovs'ka, S.I. (2016). Ecology of urban systems. Zhytomyr: Publisher O.O. Evenok. 460.*
4. *Korendyaseva, Ye.V. (2017). Environmental aspects of city management. Moscow: MGUU Moscow Government. 162*
5. *Stolberg, F.V. (2000). Ecology of the city. Kyiv: Libra. 464.*
6. *Prepotenska, M. (2014). Homo Urbanus: the human phenomenon of the metropolis. Dnepropetrovsk: Ed. Serednyak T.K. 420.*
7. *Golubev, G. E. (2005). Underground urbanism and the city. Moscow: MIKHiS.*
8. *Gilbert, P.H. et al., (2013). Underground Engineering for Sustainable Urban Development. Washington: The National Academies Press.*
9. *Kartozhiya, B.A. (2015). Development of underground space in large cities. New trends. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), (1), 615-629.*
10. *Hayko, H.I., Matviychuk, I.O., Bilets'kyi, V.S., Saluha, P. (2018). Methods of forecast assessment of the favorable geological environment for the construction of underground urban planning objects. Visnyk of Kharkiv National University named after VN Karazina. Series "Geology. Geography. Ecology", (48), 39-51.*
11. *Pankratova, N.D., Hayko, H.I., Savchenko, I.O. (2020). Development of underground urban planning as a system of alternative design configurations. Kyiv: Scientific thought. 134.*
12. *Bezlyubchenko, O.S., Hordiyenko, S.M., Zaval'nyy, O.V. (2008). Urban planning and transport. Kharkiv: KNAMG. 156.*
13. *Hayko, H.I., Bulhakov, V.P., Siverny, M.O. (2016). The system of automobile tunnels as a way to solve transport and environmental problems of the metropolis. Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute". Series "Mining", (30), 196-206.*
14. *Vähäaho, I. (2014). Underground space planning in Helsinki. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, (6).*
15. *Sterling, R., Admiraal, H., Bobylev, N., Parker, H., Godard, J. P., Vähäaho, I., Shi, X., and Hanamura, T. (2012). Sustainability issues for underground spaces in urban areas. Proceedings of ICE. Urban Design and Planning, 165(4), 241-254.*
16. *Resin, V.I., Popkov, YU.S. (2013). Development of large cities in a transitional economy. Systems approach. Moscow: Book House "LIBROKOM". 328.*
17. *Popkov, YU.V., Posokhin, M.V., Gutnov, A.E., Shmul'yan, B.A. (1983). System analysis and problems of urban development. Moscow: Science. 368.*
18. *Nedashkivs'ka, N.I. (2018). 18. A systematic approach to decision support based on hierarchical and network models. Systems research and information technology, (1), 7-18.*

19. Nedashkivska, N.I. (2013). A method of consistent pairwise comparisons for decision alternatives evaluation in terms of a qualitative criterion. *System research and information technologies*, (4), 67 – 79.
20. Pankratova, N. D., Nedashkovskaya, N. I. (2018). Evaluation of Ecology Projects for Black Sea Odessa Region on Basis of a Network BOCR Criteria Model. *IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*, October 2018.
21. Pankratova, N. D., Nedashkovskaya, N. I. (2016). Estimation of Consistency of Fuzzy Pairwise Comparison Matrices using a Defuzzification Method. V. A. Sadovnichiy and M. Z. Zgurovsky (eds.). *Advances in Dynamical Systems and Control, Studies in Systems, Decision and Control*, (69), 375-386. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40673-2_20.
22. Nedashkiv's'ka, N.I. (2016). Estimation of stability of local weights of alternative solutions based on the method of pairwise comparisons. *Systems research and information technology*, (4), 14-22.
23. Nesticò, A., Elia, C., Naddeo, V. (2020). Sustainability of urban regeneration projects: Novel selection model based on analytic network process and zero-one goal programming. *Land Use Policy*, (99). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104831>.
24. Mohammed Ameen, R. F., Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process, *Sustainable Cities and Society*, (44), 356-366.
25. Doyle, M. R. (2020). Mapping urban underground potential in Dakar, Senegal: From the analytic hierarchy process to self-organizing maps, *Underground Space*, 5 (3), 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.04.004>.
26. Peng, J., Peng, F-L (2018). A GIS-based evaluation method of underground space resources for urban spatial planning: Part 1 methodology, *Tunnelling and Underground Space Technology*, (74), 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.002>.
27. Master plan for the development of Kyiv and its suburbs until 2025 (draft). Available at: <https://kga.gov.ua/generalnij-plan>.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 21 May 2021

Accepted 30 June 2021

*Роботу виконано 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»