

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.14.258-280

УДК 912.43:004.827:504.062

канд. техн. наук, доцент **Патракеєв І.М.**,
ipatr@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0448-8790,

канд. фіз.-мат. наук, доцент **Нафєєв Р.К.**,
donrkn@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2721-9718,

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій,

канд. техн. наук, доцент **Зіборов В.В.**,

ziborov@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4397-1782,

Київський національний університет будівництва і архітектури,

канд. техн. наук, доцент **Міхно О.Г.**

almikhno@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4994-2405

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ МЕТАБОЛІЧНОГО ПІДХОДУ

Розглянуто системний аналіз сталого розвитку міського середовища на прикладі українських міст Одеси та Кривого Рогу на основі метаболічної концепції міста, яка розглядає міське середовище як відкриту динамічну систему, через яку проходять взаємопов'язані потоки енергії, ресурсів і відходів. Для кожного з міст обчислено значення потенційних, реальних і втрачених можливостей ключових підсистем, що дало змогу сформуванню інтегрального індикатора ефективності метаболізму міського середовища як основу для сценарного прогнозування і розробки стратегій відновлення.

Таким чином, представлений у роботі підхід не лише має наукову новизну, а й безпосереднє прикладне значення для органів місцевого самоврядування, урбаністів, містобудівників та екологів, які працюють в умовах обмежених ресурсів та високої невизначеності.

Ключові слова: міське середовище; міський метаболізм; стратегія відновлення інфраструктури; планування стійкого розвитку; сталий розвиток; геоінформаційний моніторинг; підтримка прийняття рішень

Постановка проблеми. Сьогодні конфлікт економіко-центристського та біосферно-сумісного ставлення до потенціалу міського середовища (МС) може бути вирішений, або значно послаблений, якщо модель управління сталим розвитком буде ґрунтуватись на фундаментальному принципі збереження потужності [9, 13]. Тобто, будь-яка відкрита енергетична система має загальну потужність, яка дорівнює сумі активної (корисної) потужності і потужності

витрат зі збереженням розмірності [22, 29], яка визначає взаємодію між простором і часом. У вересні 2019 року були затверджені "Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року". Проте, в існуючих методологічних підходах до оцінювання сталого розвитку (Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку НТУУ "КПІ", Інститут географії НАН України, Інститут проблем природокористування та екології НАН України, ДБН 5.1.1-13:2012) комплексні індекси не узгоджені з фундаментальним принципом збереження потужності, що є основоположним для аналізу відкритих систем у контексті сталого розвитку.

Наявність розрізаних методичних підходів і інструментів інтегральної оцінки соціо-природного потенціалу МС ускладнює можливість муніципальним органам влади формувати науково-обґрунтовані проекти стратегій сталого місцевого розвитку та переходу на безвуглецеві технології та ощадливе енергоспоживання. В якості узагальнюючого підходу в статті пропонується застосувати концепцію метаболізму міського середовища (ММС). Ця концепція ґрунтується на тому, що через міське середовище проходять три матеріально-енергетичних потоки: потік на вході системи, потік корисної енергії і потік енергетичних втрат. Потік корисної енергії забезпечує життєдіяльність населення та функціонування міського господарства. Якщо потік матеріально-енергетичних втрат істотно перевищує потік корисної енергії, то міське середовище розвивається шляхом деградації і дезінтеграції.

Для оцінки і прогнозування розвитку міського середовища за цим законом необхідне моделювання досліджуваної території з урахуванням індикаторів стану матеріально-енергетичних потоків. Виходячи з цього, актуальним питанням є розробка методологічних основ реалізації геоінформаційної технології управління сталим розвитком МС на основі метаболічного підходу. Такий підхід забезпечить науково-обґрунтований інструментарій формування сценаріїв підвищення ефективності міських територій з врахуванням їх особливостей, слабких сторін та потенційних можливостей. Удосконалення та розробка нових методів, моделей та інструментів для прийняття управлінських рішень є важливим завданням реалізації концепції сталого розвитку МС, яка є логічним продовженням вчення В. І. Вернадського про ноосферу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція "метаболізму" виникла в кінці дев'ятнадцятого століття як засіб опису обміну речовинами між організмом і навколишнім середовищем [13, 15]. Управління процесом взаємодії між людиною і природою дає можливість регулювати і контролювати обмін потоками енергії та речовини між соціумом і довкіллям [14].

В останні два десятиліття в зарубіжній та вітчизняній технічній літературі спостерігається підвищена зацікавленість до поняття "міський метаболізм" завдяки тому, що міста, як домінуюча форма існування людини, стають точками економічного зростання і центрами соціального розвитку країн в 21 столітті [30]. Сучасні наукові дослідження, присвячені концепції міського метаболізму, можна умовно розділити на біофізичне і соціально-економічне спрямування. Біофізичний напрям охоплює інженерний підхід та науки про сталий розвиток, які прагнуть кількісно оцінювати потоки речовини і енергії. Соціально-економічний напрям, заснований на географії, соціології та економіці, спрямовано на якісне розуміння джерел формування матеріально-енергетичних потоків в процесі урбанізації територій [26].

Родоначалником біофізичного напрямку з середини 20 століття є відомий еколог Юджин Одум (1963). З того часу міський метаболізм перетворився в основний інструмент досліджень в екологічній економіці, в системній екології та науках про сталий розвиток екологічних систем [12, 19, 33]. Згідно цих наукових досліджень міський метаболізм розглядається як "сукупність технічних і соціально-економічних процесів, які відбуваються в містах та призводять до виробництва енергії і генерації відходів" [18]. Відмінною рисою біофізичного напрямку є концепція переходу від лінійної моделі споживання природних ресурсів (більше споживаєш – більше витрачаєш) до моделі безвідходного виробництва і використання відновлювальної енергетики (концепція "кругового метаболізму"). На сьогодні концепція "кругового метаболізму" становить основу реконструкції району Стокгольма *Hammarby Sjöstedurban* [11], який в рамках Євросоюзу вважається зразком сталого міського розвитку. Основними відмінностями соціально-економічного напрямку в розумінні метаболізму є взаємодія таких процесів як забезпеченість робочими місцями населення, зниження рівня бідності, розвиток сфери послуг, підвищення ефективності охорони здоров'я тощо [31].

Використання даних з географічною прив'язкою і баз просторових даних геоінформаційних систем в даний час є базисом для сучасного аналізу матеріально-енергетичних потоків і, як результат, планування міського розвитку на основі метаболізму [33]. Це особливо важливо, коли результати досліджень міського метаболізму використовуються для просторового планування та прогнозування використання природних ресурсів і можуть забезпечити побудову стратегії безвуглецевого енергозабезпечення розвитку міста [32, 33].

Важливим з точки зору планування споживання енергоресурсів є градієнт щільності (міра зміни будь-якої фізичної величини в просторі на одиницю довжини). В роботах [17, 21] проведено дослідження меж зміни його ідеального рівня з точки зору викидів парникових газів міського середовища. Досліджено

та розроблено рекомендації щодо зниження навантаження на довкілля для компактних міст Євросоюзу [29]. Ці міста характеризуються високою щільністю населення, високою часткою використання громадського і безвуглецевого транспорту, однак мають жорсткий ступінь обмежень на житлову площу для одного мешканця.

Сучасні публікації [19, 22, 28], реалізовані проекти Європейського союзу [16, 20, 27], зростаюча роль міст в житті населення, зростання споживання енергії та природних ресурсів підтверджують необхідність вивчення і дослідження ММС.

Авторами дослідження було опубліковано низку наукових статей, в яких висвітлено окремі етапи реалізації корисної моделі оцінювання ефективності метаболізму міського середовища в практичній площині. Так, в роботах [5, 24] розроблено методику оцінювання та індикатори ефективності метаболізму міського середовища (ЕММС) на основі експертно-значущих показників речовинно-енергетичних потоків. Структура та принципи побудови каталогу метаданих показників ЕММС та структура нечіткої бази знань продукційного типу розглянуті в роботах [4, 24]. Удосконалення інфраструктури просторових даних з врахуванням каталогу метаданих показників ЕММС, відповідно до вимог INSPIRE, розглянуто в роботі [23].

Забезпечення сталого розвитку міського середовища вимагає різнобічної методологічної основи, яка допускає використання методів і моделей для різних рівнів складності і різних способів дослідження та прийняття рішень. З огляду на вищесказане, в статті запропонований інструментарій на основі інтеграції геоінформаційних технологій і сучасних обчислювальних математичних моделей. Такий підхід може застосовуватись в системі управління сталим розвитком МС.

Мета статті. Передбачається, що з практичної точки зору реалізація концепції метаболізму дозволить будувати ефективно функціонуюче міське середовище, підвищити ефективність процесів метаболізму та зменшити навантаження на довкілля. З урахуванням цього припущення, *метою дослідження* є розробка методологічних засад застосування геоінформаційних технологій управління сталим розвитком міського середовища на основі метаболічного підходу.

До дослідження було залучено два українських міста – Одесу та Кривий Ріг (рис. 1). Одеса є багатофункціональним містом площею понад 236,9 км² та населенням 993,12 тис. мешканців, з високою для міст України щільністю населення 4251,3 особи/км². Місто Кривий Ріг є потужним індустріальним центром, на сьогодні воно є лідером за виробництвом промислової продукції в Україні. Однак Кривий Ріг має складні екологічні умови існування. У ньому

налічується 619,3 тис. мешканців на площі 430 км², щільність населення дорівнює 1505 осіб/км².



Рис. 1. Географічні характеристики індустріального міста Кривий Ріг та багатофункціонального міста Одеса

При проведенні досліджень, пов'язаних з визначенням речовинно-енергетичних потоків, доступ до даних є завжди фундаментальною проблемою. Навіть якщо дані існують, частіше вони або недоступні, або не структуровані в належній формі. Це доказує факт слабо розвинутого питання метаболізму в рамках прийняття управлінських рішень в контексті сучасних завдань розвитку міського середовища. Для досягнення поставленої мети дослідження частка вихідних даних була відповідним чином обчислена або отримана з відкритих джерел [3, 7].

Виклад основного матеріалу досліджень

Зв'язок потоків енергії з метаболізмом міського середовища.

Споживання енергії і розвиток міського середовища тісно пов'язані. Споживання енергії впливає на процеси урбанізації, що, в свою чергу, збільшує антропогенне навантаження на довкілля: підвищується щільність населення, розростаються території міст і агломерацій, зростає щільність забудови міської території, зростає насиченість міських територій інженерною інфраструктурою, збільшуються обсяги промислового виробництва, зростає рівень автомобілізації. Іншими словами, енергетичні сценарії розвитку на найближче майбутнє повинні вмещувати заходи, які спрямовані на зниження попиту на енергію та оптимізацію управління енергоспоживанням, постійне скорочення використання викопної, ядерної енергії та збільшення використання відновлювальних джерел енергії.

Енергетичні основи взаємодії суспільства і довкілля вперше були розглянуті видатним українським науковцем, демократом С.А. Подолинським (1851–1890) [6]. Відповідно до схеми Подолинського, взаємодія суспільства і довкілля описується наступними енергетичними потоками: потоком енергії на вході системи E , активним потоком енергії на виході з системи суспільного виробництва (потік вільної енергії B), пасивним потоком енергії (втрати енергії A). Вимірювання потоків енергії в системі «суспільство-довкілля» дозволяє визначити: $N = \frac{dE}{dt}$ – повну потужність, яка дорівнює кількості підведеної до системи енергії в одиницю часу; $P = \frac{dB}{dt}$ – корисну потужність системи суспільного виробництва, яка дорівнює кількості споживаної системою енергії в одиницю часу; $L = \frac{dA}{dt}$ – потужність втрат, яка дорівнює кількості неперетвореної енергії в одиницю часу. На рис. 2 подано структуру, яка є інтегральним виразом схеми Подолинського та надає можливість описати процес взаємодії в системі «суспільство-довкілля» в термінах потужності. Як показано в дослідженнях [9], фундаментом науки сталого розвитку є принцип збереження потужності, окремі випадки якого виявлені Жозефом Лагранжем (1789 р.), Джеймсом Максвеллом (1855 р.), Победінським і Кузнецовим (1958 р.). Цей принцип стверджує, що при будь-яких перетвореннях відкритих для потоків енергії систем, в тому числі живих, зберігається величина потужності як кількісно-якісна визначеність:

$$N=P+L = const. \quad (1)$$

З виразу (1) видно, що зменшення потужності втрат L може бути забезпечене (за умови постійної повної потужності) тільки за рахунок збільшення корисної P потужності (продуктивності). В свою чергу, збільшення корисної потужності залежить від підвищення ефективності використання повної потужності N . Це досягається шляхом використання сучасних інноваційних технологій, поліпшення якості виробництва, застосування відновлюваних джерел енергії, оптимізації обороту побутових і промислових відходів, підвищення безпеки населення, збільшення мобільності населення за рахунок поліпшення роботи громадського транспорту тощо. Таким чином, з виразу (1) випливає тільки два напрями розвитку відкритих систем [8]: або має місце зростання корисної потужності P , або потужності втрат L (зростає ентропія).

Вплив на зростання корисної потужності для відкритих систем (Е.С. Бауер, В.І. Вернадський, П.Г. Кузнецов) є ідеалом ноосферного управління сталим розвитком. Розвиток зберігається, коли має місце процес неубутних

темпів зростання корисної потужності. Розвиток вважається сталим при умові узгодженості його з ЗЗП. Відносно до МС сталий розвиток досягається за допомогою ноосферного управління, узгодженого з ЗЗП.

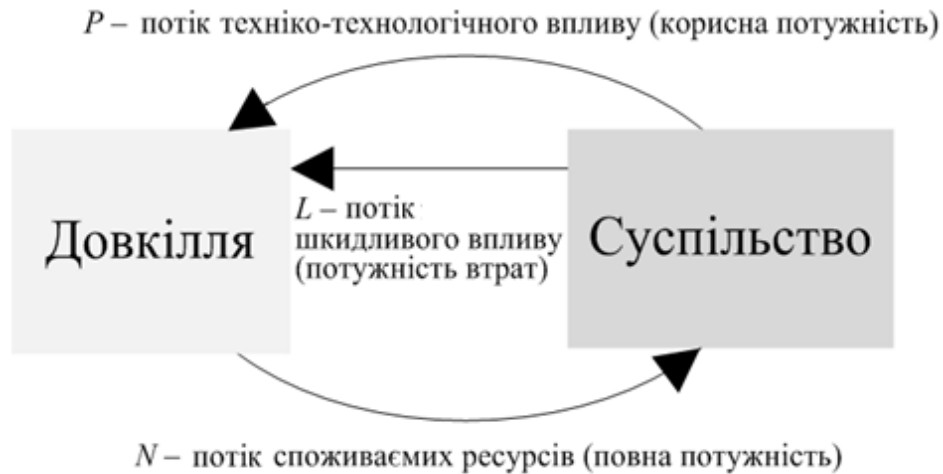


Рис. 2. Структура процесу взаємодії в системі «суспільство-довкілля» в термінах потужності

Всі проблеми і особливості життєдіяльності міст об'єднує концепція сучасного великого міста, що базується на парадигмі метаболізму. Під метаболізмом розуміють різні форми взаємодії матеріальних, енергетичних, людських і природних компонентів та систем МС [13, 14]. Міська морфологія безпосередньо пов'язана з ЕММС. Існуюча в місті інфраструктура значно впливає на екологічний слід населення [14]. Наприклад, електроенергія, що споживається в містах України, генерується переважно на основі використання первинного викопного палива. Між тим, енергетика країн Європейського союзу орієнтована на інтенсифікацію використання поновлюваних природних ресурсів.

Взявши за основу схему процесу взаємодії «суспільство-довкілля» Подолинського, авторами розроблена концептуальна модель метаболізму МС (рис. 3). Різні підсистеми МС подано за методом дослідження чорної скриньки, коли більше йде зосередження на балансі потоків енергії або матерії і менше – на процесах взаємодії, які забезпечують цей баланс.

З функціональної точки зору в концептуальній моделі розглянуто три основних життєзабезпечуючих підсистеми МС:

- транспортна підсистема, яка характеризує просторову *мобільність* і мультимодальні переміщення населення, а також кількість енергії, що витрачається на забезпечення просторової мобільності населення міста, обсяги емісії CO₂ та інші забруднювачі довкілля;

- підсистема міське господарство, яка характеризує *умови комфортного життя*, а також кількість витрачених ресурсів, що припадають на одного

мешканця для забезпечення даного рівня комфорту МС, та кількість відходів, які генеруються процесами життєдіяльності;

– соціально-економічна підсистема, яка забезпечує здоровий рівень життя населення та характеризується кількістю валового внутрішнього продукту, кількістю пропозицій робочих місць, кількістю енергії, води, відходів, що витрачаються галузями промисловості, кількістю податків на душу населення тощо.

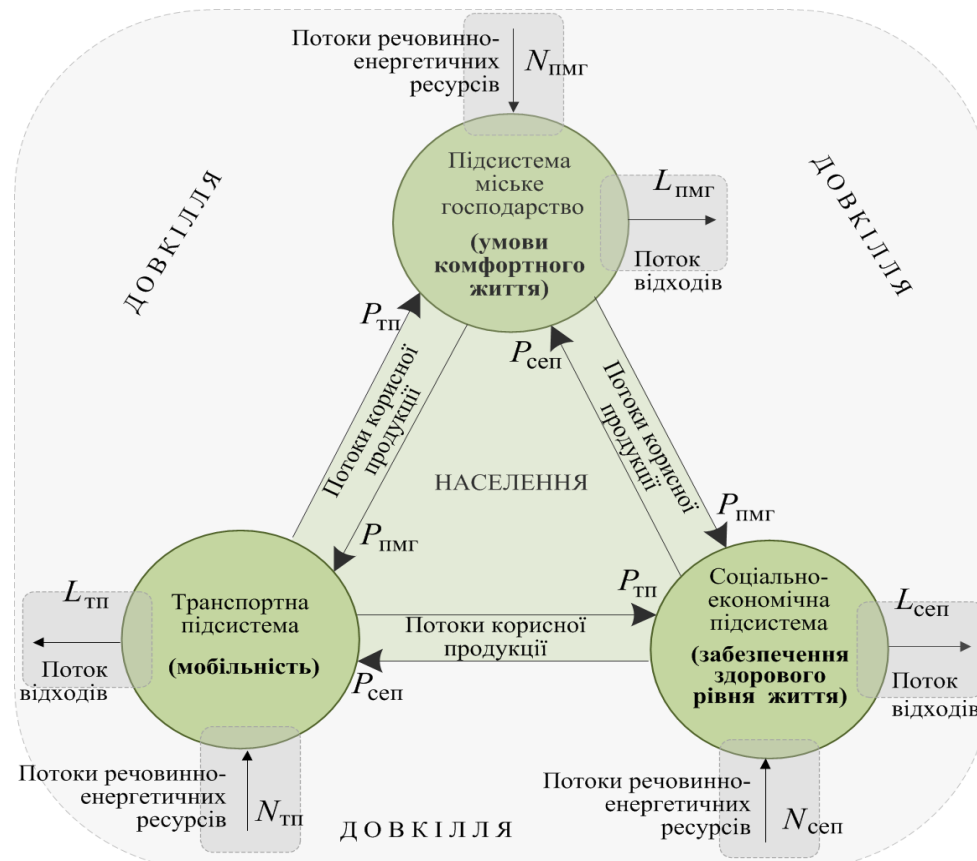


Рис. 3. Концептуальна модель метаболізму міського середовища

Концептуальна модель дозволяє подати МС як мережу вза'ємопов'язаних двигунів, які виробляють корисну роботу в різних формах. Підсистеми МС обмінюються між собою та довкіллям речовиною та енергією. Підсистеми МС, які не виробляють корисну роботу, відносяться до чисто дисипативних систем.

Кожна з розглянутих вище підсистем МС має свою власну ефективність залежно від енергетичних витрат в кожній з них. В сукупності кожна з підсистем вносить свій вклад в комплексну оцінку ЕММС. Методику обчислення та математичну модель оцінювання ЕММС детально розглянуто в статтях [24, 25]. Математична модель оцінювання ЕММС реалізована в програмному середовищі *MatLab* (*The MathWorks Inc.*).



Рис. 4. Інформаційна потокова модель метаболізму підсистеми міського середовища міське господарство

На рис. 4 подано інформаційну потокову модель (ІПМ) метаболізму підсистеми міське господарство. ІПМ дозволила визначити експертно-значимі індикатори, які характеризують повну потужність, корисну потужність та потужність втрат підсистеми міське господарство. Всього для розглянутої підсистеми (рис. 4) визначено 16 експертно-значимих індикаторів.

Наприклад, реальні можливості підсистеми міське господарство визначаються індикаторами: щільністю населення (осіб/га), щільністю забудови міста ($m^2/га$), коефіцієнтом щільності забудови (m^2/m^2), річною витратою енергії на опалення житлових будинків (МВт/рік), загальним споживанням електроенергії в житлових будинках (кВт/рік). Таким чином, потік споживання речовинно-енергетичних ресурсів має різномірний, гетерогенний характер, що і обґрунтовує використання для обчислення ЕММС методів нечіткої логіки. Ці методи були реалізовані в додатку *Fuzzy Logic Toolbox* програмного середовища *MatLab 2010*.

Сценарне прогнозування сталого розвитку міського середовища.

Сценарне прогнозування є одним з найбільш ефективних способів передбачення тенденцій або тих чи інших варіантів розвитку МС. В якості інструмента формування варіантів сценаріїв пропонується використовувати індикатор ЕММС. На рис. 5 показана узагальнена схема системи геоінформаційного моніторингу, яка застосовується для сценарного прогнозування сталого розвитку МС.

Схема передбачає наявність трьох модулів: модуля моніторингу, модуля оцінювання та прогнозування і модуля управління та контролю. Розглянемо більш детально зміст цих модулів.

Перший модуль – моніторинг. Можливі наступні види інформаційної взаємодії з об'єктом моніторингу:

$$\{\phi^1, \phi^2, \phi^3, \phi^4, \phi^5, \phi^6, \phi^7, \dots, \phi^d\} \in \Phi,$$

де, ϕ^1 – фотограмметричне знімання, ϕ^2 – аерокосмічне знімання, ϕ^3 – супутникові вимірювання, ϕ^4 – геодезичні вимірювання, ϕ^5 – обробка інформації за допомогою геоінформаційних технологій, ϕ^6 – обробка даних польових вимірювань, ϕ^7 – інфрачервоне та радіолокаційне знімання, ..., d – кардинальне число множини Φ .

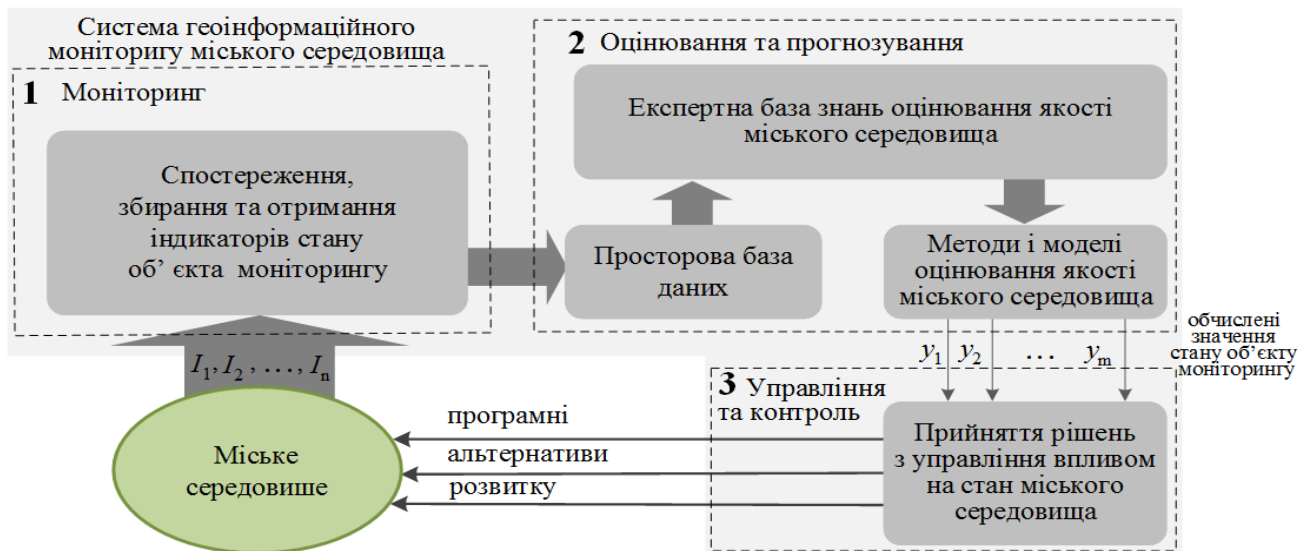


Рис. 5. Узагальнена структура системи геоінформаційного моніторингу оцінювання і управління сталим розвитком міського середовища

Під час комплексної інформаційної взаємодії з об'єктом моніторингу визначаються характеристики стану міського середовища:

$$\{I_l^P\} \supseteq \{I_l^{PA}\}, l \in L, \quad (2)$$

де, I_l^P – множина індикаторів, що визначаються;

I_1^{PA} – набір значущих індикаторів стану міського середовища.

Другий модуль – оцінювання та прогнозування сталого розвитку міста. На цьому етапі використовуються три взаємопов'язані компоненти: просторова об'єктно-реляційна база даних, нечітка база знань і орієнтовані на знання методи для розрахунку оцінки якості міського середовища. Формально схема просторової об'єктно-реляційної бази геопросторових даних може бути подана як:

$$BGD = \langle R, L, C \rangle,$$

де, $R = \{r_q, | r = \overline{1, n}\}$ – набір відношень бази даних;

$L = \{l_v, | v = \overline{1, h}\}$ – множина зв'язків між наборами відношень R;

C – множина правил і обмежень, які забезпечують цілісність бази і узгодженість даних.

В роботах [24, 25] детально розглянуто структуру та зміст наборів класів просторової бази даних та нечіткої бази знань. Нечітка база знань містить продукційні правила у вигляді [40]:

$$\left[\prod_{k=1}^n (I_k = A_k^j) \right] \rightarrow y_i(I_1, \dots, I_n), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, q},$$

де, I_k – вхідні вимірювані величини (індикатори), $k = \overline{1, n}$;

A_k^j – нечітка множина з відповідною функцією належності μ_k^j , $k = \overline{1, n}$, $j = 1; 2; 3$, що відповідає оцінюванню вимірюваних величин як "найгірша", "середня" та "задовільна";

$y_i(I_1, \dots, I_n)$ – вихідні дані, які описуються лінійною моделлю середньозважених значень вхідних вимірюваних величин.

Нечітка база знань містить експертні знання, які характеризують якісні та кількісні показники речовинно-енергетичних потоків взаємодії міського середовища з довкіллям.

Третій модуль – управління та контроль. В ньому реалізується функція прогнозування та управління сталим розвитком міського середовища на основі сценарного підходу.

Основним компонентом оцінювання ЕММС є просторові дані у зв'язку з тим, що джерела виникнення речовинно-енергетичних потоків не співпадають з місцями споживання. Вони подаються у вигляді цифрових даних про просторові об'єкти і вміщують дані про їх просторові та непросторові властивості. Показник ЕММС, визначений в статті, спирається на 37 експертно-значимих показників, які описують речовинно-енергетичні потоки ММС [25]. Ці змінні агрегуються на основі застосування ієрархічної процедури, яка ґрунтується на логічних правилах таким чином, щоб отримати узагальнену

оцінку по шкалі від 0 до 100. Таким чином, показник ЕММС має інтерпретацію логічної конструкції, яка спрямована на обчислення ефективності МС.

Технологія оцінювання ЕММС була реалізована на застосуванні потужної системи *ArcGIS 10* та можливостей програмного середовища *MatLab 2010*. На рис. 6 наведено *grid*-моделі щільності вуличної-дорожньої мережі та землекористування для міст Одеси, Кривого Рогу та Барселони, які характеризують їх просторові властивості.

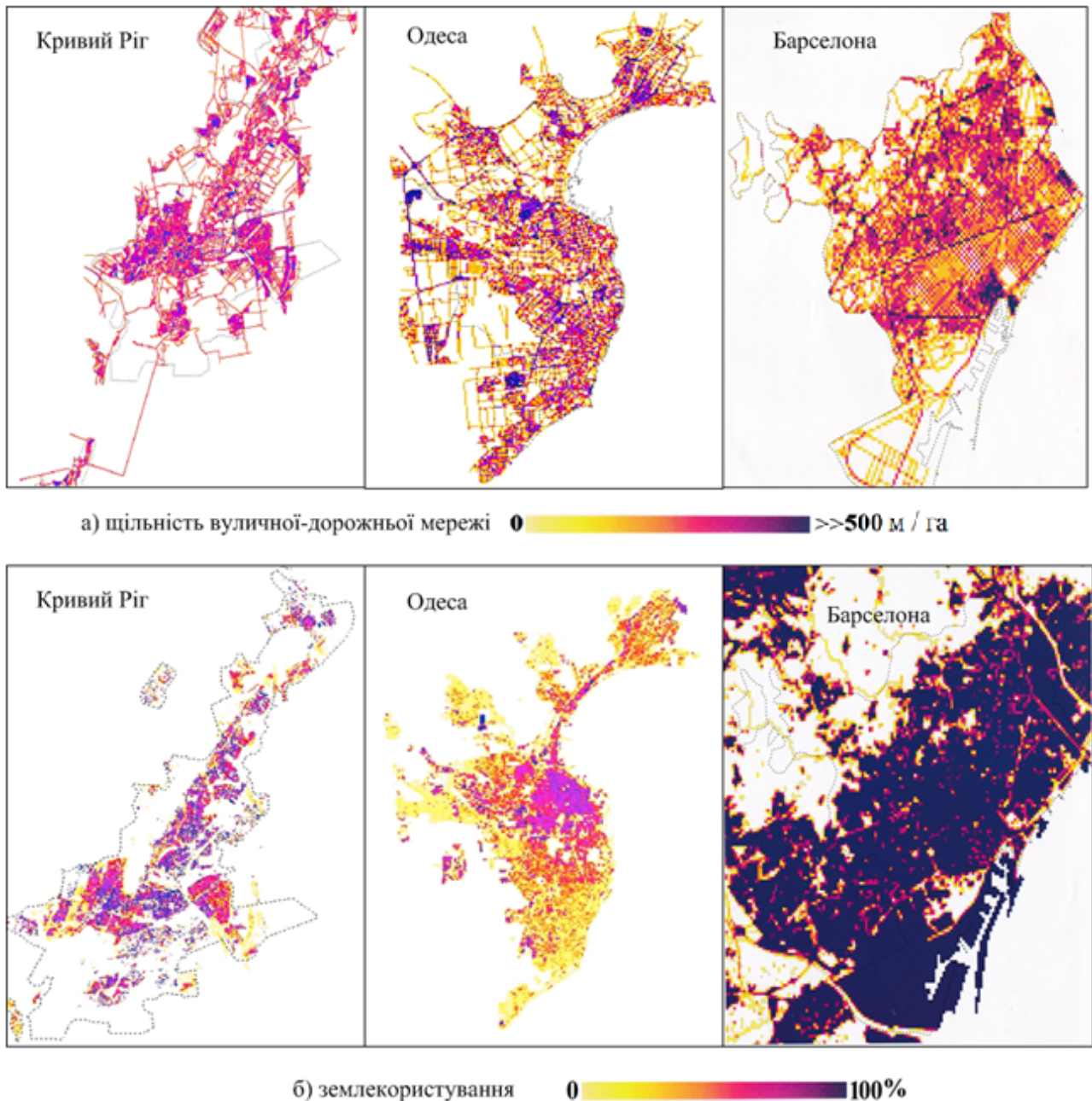


Рис. 6. Порівняння морфології міст: щільність вуличної-дорожньої мережі (а), організація землекористування (б)

Для порівняння наведені аналогічні індикатори ЕММС для міста Європейського Союзу Барселони (Іспанія). Просторові моделі дозволяють

будувати сценарії залежності індексу ЕММС в залежності від відсотків низьковуглецевого транспорту та середнього пробігу приватного автотранспорту в міському циклі. Графічна інтерпретація такого сценарію наведена на рис. 7 для міст Одеси (а), Кривого Рогу (б) та Барселони (в).

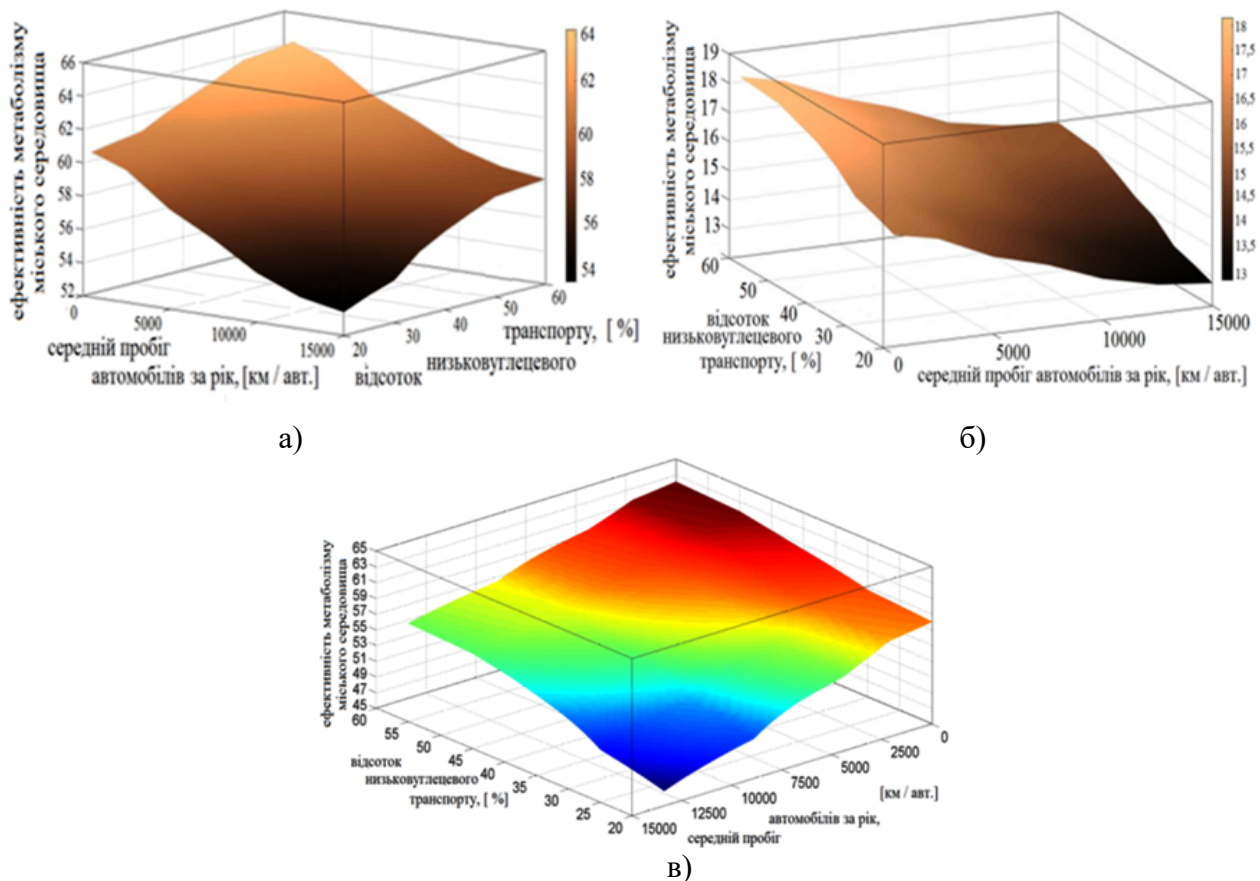


Рис. 7. Сценарії впливу частки низьковуглецевого транспорту і середнього міського пробігу приватного автотранспорту на індикатор метаболізму для міст Одеси (а), Кривого Рогу (б) та Барселони (в)

Поверхні, що подані на рисунку 7, можна розглядати як ландшафт ефективності метаболізму (ЛЕМ) в умовах заданих змінних. Сценарії дозволяють визначити, як збільшення середнього пробігу автомобілів в міському циклі може бути компенсоване за рахунок збільшення частки низьковуглецевого транспорту. Частка низьковуглецевого транспорту, яка може компенсувати збільшення середнього пробігу автомобілів, для Одеси та Кривого Рогу суттєво відрізняється.

На рис. 8 показана така ж ситуація, як і на рис. 7, але у вигляді контурних ліній. Індикатор ЕММС залишається постійним при русі вздовж контурної лінії на ЛЕМ. Максимальне збільшення ЕММС досягається під час руху за напрямком, що є ортогональним до контурних ліній. Таким чином, можна вибрати оптимальну стратегію збільшення ЕММС в просторі розглянутих змінних. Чим ближче контурні лінії, тим більш чутливим є індикатор ЕММС до

змін показників: відсотків низьковуглецевого транспорту та середнього міського пробігу приватного автотранспорту. Таке подання продукує нові знання про шляхи і методи підвищення ЕММС та забезпечує прийняття науково-обґрунтованих рішень.

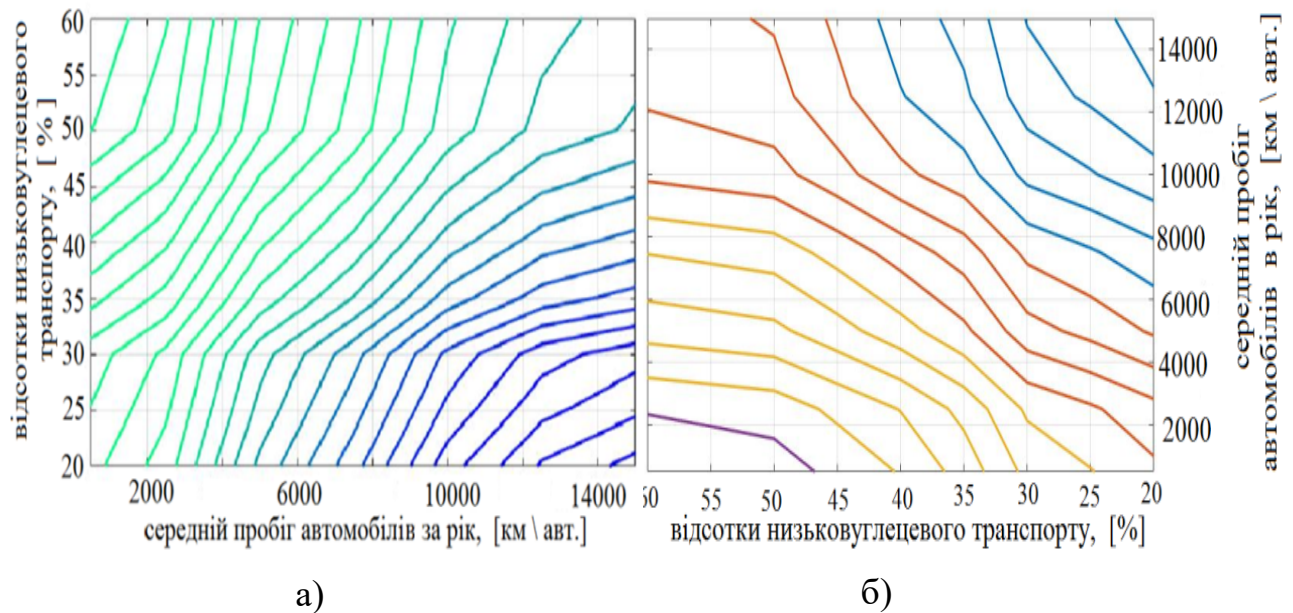


Рис. 8. Контурні лінії ЛЕМ для Одеси (а) та Кривого Рогу (б) в просторі двох індикаторів: відсотка низьковуглецевого транспорту та середнього пробігу приватного автотранспорту в міському циклі

На рис. 9 наведено приклад сценарію залежності індикатора ЕММС від викидів оксидів азоту NO_x , який обчислено для міст Одеси та Кривого Рогу. Основним антропогенним джерелом надходження оксидів азоту в довкілля є автотранспортні засоби, літаки, спалювання викопного палива, біомаси, опалювання житлового фонду та підприємств тощо.

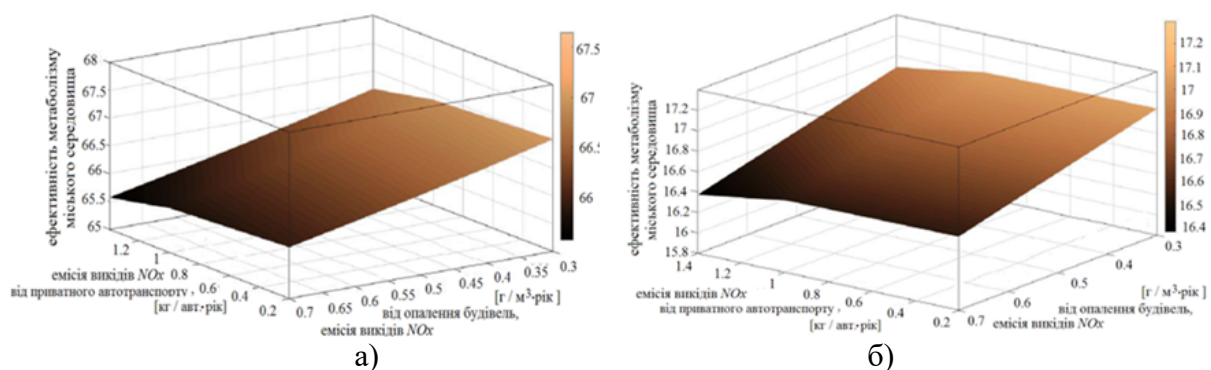


Рис. 9. Сценарії залежності індикатора ЕММС від викидів оксидів азоту для міст Одеси (а) та Кривого Рогу (б)

На основі використання 37 експертно-значущих індикаторів [25], були обчислені значення повної, корисної та втраченої потужностей, а також

інтегральна оцінка ЕММС для визначених міст (рис. 10). Для порівняння наведені аналогічні показники для міста Євросоюзу Барселони, які отримані в рамках Програми моніторингу сталого розвитку міст Європейського союзу [10].

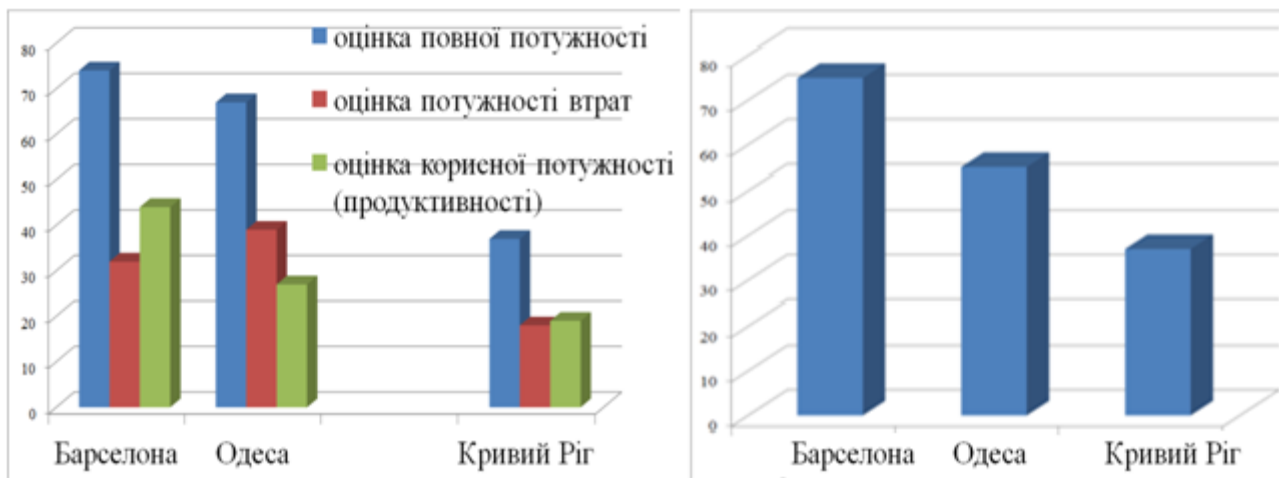


Рис. 10. Порівняльна оцінка обчислених показників повної, корисної та втраченої потужностей МС (а) та інтегральна оцінка ЕММС (б) для міст Барселони, Одеси та Кривого Рогу

Сценарії дозволяють оцінювати динаміку змін індикатора ЕММС та оптимізувати програми стратегії розвитку міст в просторі заданих критеріїв. Під оптимізацією розуміється вибір параметрів управління, які можуть максимізувати обрану цільову функцію управління. В якості цільової функції може бути обрано, наприклад, розвиток безвуглецевого транспорту, або застосування технологій термомодернізації житлових та виробничих приміщень з метою зниження викидів оксидів азоту, діоксиду вуглецю, або підвищення відсотків використання низьковуглецевого автотранспорту.

Зрозуміло, що побудована потокова модель ММС є спрощенням реальності внаслідок ідеалізованих припущень відносно ігнорування великої кількості причинно-наслідкових зв'язків між експертно-значущими показниками. Але методологія управління сталим розвитком на основі метаболічного підходу може бути корисною для формування комплексних програм та стратегій сталого розвитку міського середовища.

ВИСНОВКИ

1. Невідповідність якості міського середовища потребам її населення вимагає застосування методології управління, яка забезпечить сталий характер розвитку, спираючись на новий сучасний напрям досліджень, заснований на метаболічному підході. Метаболічна точка зору дозволяє розглядати міське середовище як відкриту систему, яка зберігає величину потужності за будь-яких перетворень речовино-енергетичних потоків, що узгоджується з

фундаментальним законом сталого розвитку – законом збереження потужності.

2. Розглянуті в статті концептуальна модель метаболізму міського середовища, інформаційна потокова модель підсистем міського середовища дозволили визначити вхідні і вихідні експертно-значущі індикатори матеріально-енергетичних потоків з метою обчислення комплексної оцінки ефективності метаболізму, як для всієї системи так і для кожної з її підсистем.

3. Комплексування геоінформаційних технологій та математичних моделей оцінювання ЕММС дозволило отримати узагальнену систему геоінформаційного моніторингу оцінювання і управління сталим розвитком міського середовища на основі метаболічного підходу. Використання системи геоінформаційного моніторингу формує сценарії зміни індексу ЕММС в двовимірному просторі обраних експертно-значущих індикаторів. На основі порівняння різних соціально-економічних і технологічних індикаторів можна отримати різні сценарії поліпшення метаболізму міського середовища або, з іншого боку, за рахунок перерозподілу споживаних ресурсів забезпечити потрібний індекс ЕММС без додаткових економічних, соціальних і технологічних витрат. Так, приклад Кривого Рогу показує, що збільшення частки низьковуглецевого транспорту на 1%, при зафіксованих інших вхідних індикаторах, забезпечує зростання цього індикатора ЕММС на 0,2% за умови, якщо парк низьковуглецевих транспортних засобів вже становить понад 30%. Забезпечити, в свою чергу, зростання індикатора ЕММС можливо шляхом скорочення середнього пробігу автомобілів в міському циклі, що значно знизить мобільність населення.

4. В перспективі підхід, пов'язаний з метаболізмом міського середовища, можна розглядати як окремий напрямок моделювання просторово-часових змін з метою забезпечення сталого розвитку на рівні міських територій та регіонів.

Список джерел:

1. Аверкина М.Ф. Теорія забезпечення стійкого розвитку міст та агломерацій // Проблеми регіоналістики: минуле, сучасне, майбутнє: тези наук.-практ. Інтернет-конф. (3 берез. 2017 р.) – Київ: КНЕУ, 2017. – С. 212–215. <https://ir.kneu.edu.ua:443/handle/2010/21143>

2. Лященко А.А. Нечіткі геоінформаційні моделі прояву факторів навколишнього середовища та їх вплив на грошову вартість земель / А.А. Лященко, Є.П. Волчко, Ю.В. Кравченко // Вісник геодезії та картографії. – 2012. Вип. 1, – С. 37-43. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2012_1_9

3. Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2017 році. https://mepr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2017/Одеса_рег.доп.pdf (Дата звернення: 20.07.2021).

4. Патракеєв І.М., Зіборов В.В. Структура та принципи побудови каталогу метаданих первинних показників метаболізму міського середовища // Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування. Випуск №69, Київ, КНУБА, 2019, с. 211–225.
<http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2019/201969.pdf>
5. Патракеєв І.М. Нечітка модель індикатора ефективності метаболізму міського середовища / І.М. Патракеєв // Управління розвитком складних систем. – 2019. – Вип. 37. – С. 185-194. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/2271>
6. Подолинський С.А. Праця людини та її ставлення до розподілу енергії / С. А. Подолинський. – Вид. 2-ге. – Київ: Білі альви, – 2005. - 160 с.
7. Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй в Україні в рамках реалізації Проекту ПРООН/GIZ "Підтримка впровадження ЦСР в Україні". Регіональна доповідь "Цілі сталого розвитку: Дніпро-2030".
<https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/library/sustainable-development-report/regional-report-sdg-dnipro-2030.html>
8. Сталий розвиток підприємства, регіону, суспільства: інноваційні підходи до забезпечення: монографія, за заг. ред. Прокопенко О.В. – Ruda Śląska: «Drukarnia i Studio Graficzne Omnidium», – 2014. – 480 с.
https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/42731/1/Monograph_polska.pdf
9. Устінова І.І. Методологічні основи сталого розвитку еколого-містобудівних систем: дис. на здобуття докт. наук: спец. 18.00.01 // Київ, 2016. – 479 с.
<https://uacademic.info/ua/document/0516U000518>
10. Acebillo J. New Urban Metabolism. Barcelona / Lugano / J. Acebillo // Barcelona – New York: Editorial ActarD., – 2013. – 244 p.
<https://books.google.com/books?id=BQfi9IqhjzEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
11. City of Stockholm, 2007. Hammarby Sjöstad – a unique environmental project in Stockholm. <https://apo.org.au/node/196771> (Дата звернення: 20.07.2021).
12. Dijst M. Exploring urban metabolism – Towards an interdisciplinary perspective / M. Dijst, E. Worrell, L. Böcker et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2018, Vol. 132. – P. 190-203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302926>
13. Fischer-Kowalski, M. Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, part I: 1860-1970 // Journal of Industrial Ecology. – 1998. Volume 2, Issue 1, - P. 61-78. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1162/jiec.1998.2.1.61>
14. Fisher-Kowalski M. Socioecological Transitions and Global Change. Trajectories of Social Metabolism and Land Use // Vienna: Klagenfurt University. – 2007. – 263 p. <https://freebookpdf.download/list/socioecological-transitions-and-global-change-marina-fischer-kowalski-4900260>
15. Foster, J.B. Marx's Ecology: Materialism and Nature // New York: Monthly Review Press. – 2000. – 200 p. https://monthlyreview.org/product/marxs_ecology/

16. Goldstein, B. Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: concept development and case study / B. Goldstein, M. Birkved, M. Quitzau, M. Hauschild // *Environmental Research Letters*. – 2013, Volume 8, Issue 3, – P. 1-14. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035024/data>
17. Holden, E. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region / E. Holden, I. T. Orland // *Urban studies*. – 2005, Volume 42. Issue 12. – P. 2145–2166. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1080/00420980500332064>
18. Kennedy, C. The changing metabolism / C. Kennedy, J. Cuddihy, J. Engel-Yan // *Journal of Industrial Ecology*. – 2007, Volume 11. Issue 2. – P. 43-59. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>
19. Kennedy C. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design // *Environmental Pollution*. – 2011. Volume 159. Issue 8. – P. 1965–1973. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749110004781>
20. Kennedy, C. Urban metabolism survey design for megacities / C. Kennedy, N. Ibrahim, I. Stewart, A. Facchini, R. Mele // *Research Project Megacities: Comparative analysis of urban macrosystems – Working Paper 2*, – 2018, University of Toronto, Department of Civil Engineering, <https://www.enelfoundation.org/topic/a/2018/11/UrbanMegacities>
21. Larson, W. Energy footprint of the city: effects of urban land use and transportation policies / W. Larson, F. Liu, A. Yezer // *Journal of Urban Economics*. – 2012, 72. – P. 147–159. <https://sites.socsci.uci.edu/~jkbrueck/course%20readings/larson.pdf>
22. Liang, S. Urban metabolism in China: achieving dematerialization and decarbonization in Suzhou / S. Liang, Z. Tianzhu // *Journal of Industrial Ecology*. – 2011, Volume 15. Issue 3, – P. 420-434. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00343.x>
23. Lyashchenko, A. Assessment and management of urban environment quality in context of INSPIRE requirements / A. Lyashchenko, I. Patrakeyev, V. Ziborov, L. Datsenko, O. Mikhno, // *Theoretical and Empirical researchers in urban management*. – 2021, Volume 16. Issue 2. – P. 55-71. <http://um.ase.ro/no162/4.pdf>
24. Patrakeyev, I. Estimation of metabolic flows of urban environment based on fuzzy expert knowledge / I. Patrakeyev, V. Ziborov, O. Mikhno // *Geodesy and Cartography*. – 2020, Volume 46, Issue 1, – P. 8-16. <https://doi.org/10.3846/gac.2020.8560>
25. Patrakeyev I. Using fuzzy sets in the estimation system of the efficiency of urban environment metabolism (on the example of cities of Ukraine) / I. Patrakeyev, V. Ziborov // *Geodesy and Cartography*. – 2019. Volume 45. Issue 3. – P. 102-109. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7699>
26. Ritts, M. Literature review on the "urban metabolism concept" // *VIVA-PLAN Report (Deliverable 1.1)*. – February 2020. <https://zenodo.org/records/3690309>
27. Schremmer, C. Urban development and urban metabolism: A spatial approach / C. Schremmer, U. Mollay, W. Neugebauer, S. Novak, S. Beiglbock, B. Bory, T. Panwinkler, P.

Schwitt, A. Dubois, P. Galera-Lindblow // SUME –Working Paper 1.1, Vienna, October 2009.
https://sume.at/project_downloads/

28. Shafiea, F.A. Urban Metabolism: A Research Methodology in Urban Planning and Environmental Assessment / F.A. Shafiea, D. Omara, S. Karuppananb // Proceedings of the 1st International Conference on Research Methodology for Built Environment and Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 17-18 December 2013. – P. 1-5. <https://www.academia.edu/6780488/>

29. Thomson, G. Urban fabrics and urban metabolism – from sustainable to regenerative cities / G. Thomson, P. Newman // Resources, Conservation and Recycling. – 2017, Volume 132. Issue 2018. – P. 218–229. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3068285>

30. United Nations Population Program. Revision 2018 World Urbanization Prospects. <https://population.un.org/wup/>

31. Wachsmuth, D. Three ecologies: Urban metabolism and the society-nature opposition / D. Wachsmuth // The Sociological Quarterly. – 2012, Volume 53. Issue 4. – P. 506–523. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x>

32. Weisz, H. Reducing energy and materials flows in cities / H. Weisz, J.K. Steinberger // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2010, Volume 2. Issue 3. – P. 185–192. <https://scispace.com/papers/reducing-energy-and-material-flows-in-cities-402db7sht5>

33. Zhang, Y. Urban metabolism: A review of research methodologies / Y. Zhang // Environmental Pollution, – 2013, Vol.178. – P. 463-473. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23619057/>

Ph.D, Docent **Igor Patrakeyev**,

Ph.D, Docent **Rovil Nafeev**,

State University of Information and Communication Technologies,

Ph.D, Docent **Victor Ziborov**,

Kyiv National University of Construction and Architecture,

Ph.D, Docent **Oleksii Mikhno**,

Taras Shevchenko National University of Kyiv

SYSTEMATIC ANALYSIS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE URBAN ENVIRONMENT BASED ON THE METABOLIC APPROACH

The article examines the system analysis of sustainable development of the urban environment using the example of the Ukrainian cities of Odessa and Krivoy Rog based on the metabolic concept of the city. This concept considers the urban environment as an open dynamic system through which interconnected flows of energy, resources and waste pass. For each city, the values of potential, real and missed opportunities of key subsystems were calculated, which allowed us to form an integrated indicator of the efficiency of the metabolism of the urban environment.

Such an indicator can be used as a basis for scenario forecasting and development of recovery strategies.

Thus, the approach presented in the work has not only scientific novelty, but also direct practical significance for local governments, urbanists, city planners and ecologists working in conditions of limited resources and high uncertainty.

Keywords: urban environment; urban metabolism; infrastructure restoration strategy; sustainable development planning; sustainable development; geoinformation monitoring; decision support.

REFERENCES

1. Averkyna M.F. Theory of ensuring sustainable development of cities and agglomerations // Problems of regionalism: past, present, future: theses of the scientific-practical Internet conference (March 3, 2017) – Kyiv: KNEU, 2017. – pp. 212–215. <https://ir.kneu.edu.ua:443/handle/2010/21143>. {in Ukrainian}
2. Lyashchenko A.A. Fuzzy geoinformation models of environmental factors and their impact on the monetary value of land / A.A. Lyashchenko, E.P. Volchko, Yu.V. Kravchenko // Bulletin of Geodesy and Cartography. – 2012. Issue 1, – P. 37-43. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2012_1_9. {in Ukrainian}
3. Ministry of Environmental Protection of Ukraine. Regional report on the state of the environment in Odessa region in 2017. https://mepr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2017/Одеса_рег.доп.pdf. {in Ukrainian}
4. Patrakeyev I.M., Ziborov V.V. Structure and principles of building a metadata catalog of primary indicators of urban environment metabolism // Scientific and technical collection Urban planning and territorial planning. Issue N69, Kyiv, KNUBA, 2019, pp. 211–225. <http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2019/201969.pdf>. {in Ukrainian}
5. Patrakeyev I.M. Fuzzy model of the indicator of the efficiency of urban metabolism / I.M. Patrakeev // Management of complex systems development. – 2019. – Issue 37. – P. 185-194. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/2271>. {in Ukrainian}
6. Podolinsky S.A. Human work and its attitude to energy distribution / S. A. Podolinsky. – Ed. 2nd ed. – Kyiv: White Alvy, – 2005. – 160 c. {in Ukrainian}
7. United Nations Development Program in Ukraine within the framework of the UNDP/GIZ Project "Supporting the Implementation of the SDGs in Ukraine". Regional Report "Sustainable Development Goals: Dnipro-2030". <https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/library/sustainable-development-report/regional-report-sdg-dnipro-2030.html>. {in Ukrainian}

8. Sustainable development of the enterprise, region, society: innovative approaches to ensuring: monograph, edited by Prokopenko O.V. – Ruda Śląska: «Drukarnia i Studio Graficzne Omnidium», – 2014. – 480 с.

https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/42731/1/Monograph_polska.pdf. {in Ukrainian}

9. Ustinova I.I. Methodological foundations of sustainable development of ecological and urban planning systems: dissertation for the degree of Doctor of Sciences: speciality 18.00.01 // Kyiv, 2016. – 479 p.

<https://uacademic.info/ua/document/0516U000518>. {in Ukrainian}

10. Acebillo J. New Urban Metabolism. Barcelona / Lugano / J. Acebillo // Barcelona – New York: Editorial ActarD., – 2013. – 244 p. {in English}

<https://books.google.com/books?id=BQfi9IqhjzEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>

11. City of Stockholm, 2007. Hammarby Sjöstad – a unique environmental project in Stockholm. <https://apo.org.au/node/196771>. {in English}

12. Dijst M. Exploring urban metabolism – Towards an interdisciplinary perspective / M. Dijst, E. Worrell, L. Böcker et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2018, Vol. 132. – P. 190-203. {in English}

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302926>. {in English}

13. Fischer-Kowalski, M. Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, part I: 1860-1970 // Journal of Industrial Ecology. – 1998. Volume 2, Issue 1, – P. 61-78.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1162/jiec.1998.2.1.61>. {in English}

14. Fisher-Kowalski M. Socioecological Transitions and Global Change. Trajectories of Social Metabolism and Land Use // Vienna: Klagenfurt University. – 2007. – 263 p. {in English}

<https://freebookpdf.download/list/socioecological-transitions-and-global-change-marina-fischer-kowalski-4900260>

15. Foster, J.B. Marx's Ecology: Materialism and Nature // New York: Monthly Review Press. – 2000. – 200 p.

https://monthlyreview.org/product/marxs_ecology/. {in English}

16. Goldstein, B. Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: concept development and case study / B. Goldstein, M. Birkved, M. Quitzau, M. Hauschild // Environmental Research Letters. – 2013, Volume 8, Issue 3, – P. 1-14. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035024/data>. {in English}

17. Holden, E. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in the

greater Oslo region / E. Holden, I. T. Orland // *Urban studies*. – 2005, Volume 42. Issue 12. – P. 2145–2166.

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1080/00420980500332064>. {in English}

18. Kennedy, C. The changing metabolism / C. Kennedy, J. Cuddihy, J. Engel-Yan // *Journal of Industrial Ecology*. – 2007, Volume 11. Issue 2. – P. 43-59.

<https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107> {in English}

19. Kennedy C. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design // *Environmental Pollution*. – 2011. Volume 159. Issue 8. – P. 1965–1973. {in English}

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749110004781>

20. Kennedy, C. Urban metabolism survey design for megacities / C. Kennedy, N. Ibrahim, I. Stewart, A. Facchini, R. Mele // *Research Project Megacities: Comparative analysis of urban macrosystems – Working Paper 2*, – 2018, University of Toronto, Department of Civil Engineering,

<https://www.enelfoundation.org/topic/a/2018/11/UrbanMegacities> {in English}

21. Larson, W. Energy footprint of the city: effects of urban land use and transportation policies / W. Larson, F. Liu, A. Yezer // *Journal of Urban Economics*. – 2012, 72. – P. 147–159.

<https://sites.socsci.uci.edu/~jkbrueck/course%20readings/larson.pdf> {in English}

22. Liang, S. Urban metabolism in China: achieving dematerialization and decarbonization in Suzhou / S. Liang, Z. Tianzhu // *Journal of Industrial Ecology*. – 2011, Volume 15. Issue 3, – P. 420-434.

<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00343.x> {in English}

23. Lyashchenko, A. Assessment and management of urban environment quality in context of INSPIRE requirements / A. Lyashchenko, I. Patrakeyev, V. Ziborov, L. Datsenko, O. Mikhno, // *Theoretical and Empirical researchers in urban management*. – 2021, Volume 16. Issue 2. – P. 55-71. <http://um.ase.ro/no162/4.pdf> {in English}

24. Patrakeyev, I. Estimation of metabolic flows of urban environment based on fuzzy expert knowledge / I. Patrakeyev, V. Ziborov, O. Mikhno // *Geodesy and Cartography*. – 2020, Volume 46, Issue 1, – P. 8-16. <https://doi.org/10.3846/gac.2020.8560>. {in English}

25. Patrakeyev I. Using fuzzy sets in the estimation system of the efficiency of urban environment metabolism (on the example of cities of Ukraine) / I. Patrakeyev, V. Ziborov // *Geodesy and Cartography*. – 2019. Volume 45. Issue 3. – P. 102-109. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7699>. {in English}

26. Ritts, M. Literature review on the "urban metabolism concept" // *VIVA-PLAN Report (Deliverable 1.1)*. – February 2020. <https://zenodo.org/records/3690309>. {in English}

27. Schremmer, C. Urban development and urban metabolism: A spatial approach / C. Schremmer, U. Mollay, W. Neugebauer, S. Novak, S. Beiglbock, B. Bory, T. Panwinkler, P. Schwitt, A. Dubois, P. Galera-Lindblow // SUME –Working Paper 1.1, Vienna, October 2009. https://sume.at/project_downloads/. {in English}
28. Shafiea, F.A. Urban Metabolism: A Research Methodology in Urban Planning and Environmental Assessment / F.A. Shafiea, D. Omara, S. Karuppananb // Proceedings of the 1st International Conference on Research Methodology for Built Environment and Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 17-18 December 2013. – P. 1-5. <https://www.academia.edu/6780488/>. {in English}
29. Thomson, G. Urban fabrics and urban metabolism – from sustainable to regenerative cities / G. Thomson, P. Newman // Resources, Conservation and Recycling. – 2017, Volume 132. Issue 2018. – P. 218–229. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3068285>. {in English}
30. United Nations Population Program. Revision 2018 World Urbanization Prospects. <https://population.un.org/wup/>. {in English}
31. Wachsmuth, D. Three ecologies: Urban metabolism and the society-nature opposition / D. Wachsmuth // The Sociological Quarterly. – 2012, Volume 53. Issue 4. – P. 506–523. {in English}
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x>
32. Weisz, H. Reducing energy and materials flows in cities / H. Weisz, J.K. Steinberger // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2010, Volume 2. Issue 3. – P. 185–192. {in English}
<https://scispace.com/papers/reducing-energy-and-material-flows-in-cities-402db7sht5>
33. Zhang, Y. Urban metabolism: A review of research methodologies / Y. Zhang // Environmental Pollution, – 2013, Vol.178. – P. 463-473.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23619057/>. {in English}