

УДК 004.942:007.3

О. Міхно, канд. техн. наук, доц.  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ,  
І. Патракеєв, канд. техн. наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

*Пропонується підхід до оцінки стану навколишнього антропогенно-трансформованого середовища, заснований на метаболічній концепції міського середовища. Удосконалення існуючих та розробка нових індикаторів є важливим етапом у напрямку впровадження у практику геоінформаційного моніторингу прогнозування стану міського середовища, що дозволить реалізувати на практиці концепцію сталого розвитку міського середовища, яка сьогодні є розвитком вчення В. І. Вернадського про ноосферу.*

*Ключові слова: енергетичний баланс, ентропія, вільна енергія, алгоритм Такагі-Сугено-Канга, речовинно-енергетичні потоки, геоінформаційний моніторинг.*

**Постановка проблеми.** Сьогодні різні фінансові, містобудівні, архітектурні, екологічні і навіть політичні організації складають рейтинги міст, у яких дають комплексну оцінку сукупності економічних, соціальних і екологічних параметрів розвитку і функціонування міст: доходи і витрати населення, об'єми інвестицій в житлобудівництво й основні фонди, стан охорони здоров'я і освіти, рівень злочинності тощо. Проте, на наш погляд, ці підходи оцінюють якість міського середовища на основі окремих її складових (наприклад, оцінка еколого-містобудівної підсистеми [3], еколого-економічної складової, соціально-екологічної підсистеми [4]).

Людство переживає "урбаністичну еру", а тому особливої гостроти набувають питання, пов'язані з ефективним управлінням енергією споживання та енергією, яка витрачається на утилізацію відходів у містах. У зв'язку з цим особливої важливості набуває концепція "енергетичного балансу" в міському середовищі (МС), яка була запропонована робочою групою Всесвітньої енергетичної ради: енергія, що виробляється, має покривати енергію, що споживається.

Потоки речовини та енергії, а також продукти їхньої переробки, які розташовані на території міста, порушують матеріальний і енергетичний баланс природного

середовища та змінюють природні процеси кругообігу речовини й переходу енергії по трофічних ланцюгах.

Місто – це нерівноважена система. Стан нерівноваженості визначається масштабом антропогенних навантажень на довкілля. Показниками антропогенних навантажень можуть бути: густота населення, площа забудованих та заощених територій, навантаження від ваги будинків і споруд, обсяги промислового виробництва, рівень автомобілізації тощо [1, 2, 5].

Підсумовуючи викладене вище, слід зазначити, що якість міського середовища є фактором сталого розвитку муніципальних систем. Реалізація оцінки якості міського середовища на практиці дозволить визначити основні проблеми сталого розвитку міст та виявити міста з найкращою практикою організації якості життя.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням оцінки якості міського середовища присвячена велика кількість вітчизняних і зарубіжних досліджень [1–3, 7–10]. Згідно з індексом процвітання міст, розроблених *McKinsey Global Institute*, містобудівне середовище характеризується використанням показників густоти населення, інтенсивності використання громадського транспорту й міри озеленення громадського простору. Ще одним комплексним індикатором, який містить оцінку якості міського середовища, є індекс міського розвит-

ку (*City Development Index – CDI*), що формується на основі показників виробництва валового міського продукту, якості системи охорони здоров'я і освіти, стану інфраструктури та кількості утворених твердих побутових відходів. З одного боку, якість міського середовища розуміється як сукупність матеріальних благ, котрі за тих чи інших підстав мають бути надані мешканцям міста. З іншого боку, якість міського середовища – це комплексна оцінка розвиненості системи взаємодій і взаємовідносин жителів міста в межах міського простору співтовариства людей. Таким чином, оцінка якості міського середовища є зоною пошуку можливостей розвитку міського середовища, підвищення ефективності використання природних ресурсів, формування довгострокових стратегій стійкого розвитку. Аналіз зарубіжного досвіду показує різноманіття підходів до виявлення параметрів стану міського середовища, які характеризують його сталий розвиток [14, 16, 17].

**Мета статті:** розгляд методики оцінки стану антропогенно-трансформованого середовища за сукупністю параметрів з урахуванням неповних і неточних знань, заснованій на метаболічній концепції, та апробація цієї методики на прикладі міст України.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Споживання енергії й розвиток міста як штучного середовища перебуває в тісному зв'язку. Споживання енергії впливає на процеси урбанізації, що, у свою чергу, збільшує антропогенні навантаження на довкілля: під-

вищується густина населення, розширюються території міст і агломерацій, зростає щільність забудови міських територій та насиченість їх інженерною інфраструктурою, збільшуються обсяги промислового виробництва, росте рівень автомобілізації. Як правило, це приводить до загострення екологічних проблем.

Міста займають не більше двох відсотків земної поверхні, однак вони використовують близько 75% усіх ресурсів планети. Понад 70% світового споживання енергії припадає на міста. Будучи енергетичною мірою цивілізації, світове споживання енергії має найважливіше значення для екологічної та соціально-економічної сфер життя [13].

Міста найбільше впливають на виснаження природних ресурсів та зміну клімату на планеті. Так, згідно з даними Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) кількість парникових газів збільшується рекордними темпами. Такий тривожний сценарій вимагає вживання рішучих заходів, необхідних для того, щоб зупинити тенденції споживання копалинного палива в містах.

Зважаючи на сучасний стан економіки та технологій, виникає проблема розробки та впровадження нової енергетичної парадигми, яка дозволить розглядати міста та агломерації як частину єдиної екосистеми й перейти від лінійного процесу споживання до циклічного (тобто переробка та відновлення) – це новий вектор розвитку міського середовища, перехід від філософії мегаполісу до філософії "екополісу" (рис 1).



Рис. 1. Моделі метаболізму міського середовища (Джерело: Figure courtesy of F. Butera)

Сучасна енергетична парадигма дозволить створити ефективно працююче міське середовище, підвищити ефективність процесів споживання та трансформації речовино-енергетичних, інформаційних потоків і, відповідно, зменшить антропогенне навантаження на довкілля та залежність від викопного палива.

**Методика комплексного оцінювання якості міського середовища на основі енергетичного балансу**  
Коротко розглянемо характеристики показників, які можуть використовуватись для отримання комплексної оцінки якості міського середовища. Запропонована методика оцінки якості міського середовища базується на науковому підході "чорного ящика", за якого акцент робиться на балансі матеріально-енергетичних та інформаційних потоків і менше уваги приділяється до взаємодії процесів, які генерують цей баланс.

Кожна соціальна або жива система регулюється фундаментальним законом збереження потужності [11].

Згідно з ним: повна потужність на вході в систему дорівнює сумі активної потужності й потужності втрат на виході системи:

$$N = P + G,$$

де N – повна потужність, P – активна (корисна) потужність, G – потужність втрат.

Із цього закону випливає, що будь-яка зміна активної потужності компенсується зміною потужності втрат і знаходиться під контролем повної потужності системи.

Міське середовище можна розглядати як сукупність взаємодіючих підсистем. З функціональної точки зору найбільш істотними підсистемами міського середовища можна вважати [11, 15]:

– транспортну підсистему: характеризує просторову мобільність і мультимодальність переміщень населення, а також кількість енергії, що витрачається на забезпечення просторової мобільності населення та обсяги

емісії CO<sub>2</sub> та інших супутніх забруднювачів міського середовища;

– підсистему містоутворювальної бази: характеризується загальною кількістю витрачених матеріально-енергетичних потоків, житлової території, що припадає на одного мешканця та забезпечує цей рівень комфорту міського середовища, кількістю відповідних відходів,

породжуваних процесами життєдіяльності в міському середовищі;

– соціально-економічну підсистему: характеризується кількістю валового внутрішнього продукту, виробленого підприємствами міста, кількістю пропозицій робочих місць, кількістю студентів, кількістю енергії, що витрачається галузями промисловості, води, відходів, кількістю податків на душу населення тощо.

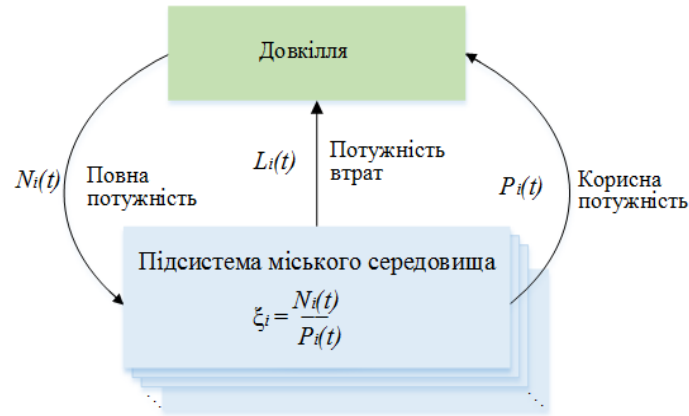


Рис. 2. Поточкова схема взаємодії підсистеми міського середовища з довкіллям

Кожна з розглянутих підсистем може бути абстрактно представлена у вигляді потокової схеми взаємодії з довкіллям, як показано на рис. 2.

Підтримка життєдіяльності міського середовища – це кругообіг речовин, тобто саме існування міського середовища залежить від постійного припливу зовнішнього потоку енергії  $N(t)$ , необхідного для життєдіяльності як живим організмам, так і для виробництва матеріалів, речовин, продуктів, ресурсів та послуг.

Підсистема отримує певну кількість різного виду енергії, речовини, інформації  $N(t)$  і виробляє два види продукції – один із яких є негативною продукцією, яка визначається потоком втрат  $L(t)$ , і другий тип, який використовується кожною підсистемою на забезпечення своєї життєдіяльності – потік корисної роботи  $P(t)$  [1].

Кожна з розглянутих вище підсистем міського середовища має свою власну ефективність ( $\xi_i$ ), залежно від енергетичних витрат у кожній з них. У сукупності кожна з підсистем робить свій внесок у комплексну оцінку ефективності метаболізму міського середовища (ММС) –  $E$ .

Отже, виникає два питання: по-перше, як виміряти ефективність кожної з підсистем міського середовища і, по-друге, яким чином інтегрувати оцінки ефективності кожної з підсистем ( $\xi_i$ ) для отримання загальної комплексної оцінки ефективності ММС.

Основні труднощі при отриманні комплексної оцінки пов'язані з проблемою спільного використання різномірних, гетерогенних даних. Інтеграція різнотипних даних в єдиний інформаційний простір забезпечує можливість їхнього комплексного аналізу й дозволяє отримати якісно нові знання про об'єкт дослідження – міське середовище. Крім того, через широкую комплексність показника ефективності міського середовища неможливо безпосередньо виміряти деякі соціальні, економічні, екологічні, містобудівні показники, які тією чи іншою мірою впливають на кінцевий показник ефективності.

#### Нечітка модель оцінювання якості міського середовища

Як комплексну оцінку ефективності ММС визначимо число  $R \in [0, 100]$ . На загальну оцінку ефективності ММС впливають як природні, так і техногенні, інфраструктурні, екологічні показники. Позначивши ці показники як  $x_1, \dots, x_n$  модель оцінки ефективності ММС може бути подана як функціональне відображення у вигляді:

$$X = (x_1, \dots, x_n) \rightarrow R \in [0, 100],$$

де  $X$  – вектор поточного стану міського середовища.

Для моделювання багатовимірних залежностей типу MISO (*Multiple Input Single Output*) "багато входів – один вихід" доцільно використовувати ієрархічні системи нечіткого логічного висновку (НЛВ). Перевагою ієрархічних систем НЛВ є їхня компактність: адекватно описати багатовимірні залежності "багато входів – один вихід" можна невеликою кількістю нечітких правил [6].

Використання ієрархічної системи НЛВ дозволяє подолати "прокляття розмірності", коли за великої кількості входів експерту важко описати причинно-наслідкові зв'язки у вигляді нечітких правил. Оскільки експерт одночасно може зберігати не більше  $7 \pm 2$  понять-ознак, то за великої кількості вхідних змінних необхідно їх класифікувати у вигляді ієрархічного дерева (рис. 3) [12]. В ієрархічних системах вихід однієї бази знань подається на вхід іншої бази знань. На рис. 3 система моделює залежність

$$Q_\Sigma = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

за допомогою трьох баз знань, які описують наступні залежності:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3), y_2 = f_2(x_4, x_5), Q_\Sigma = f_0(y_1, y_2).$$

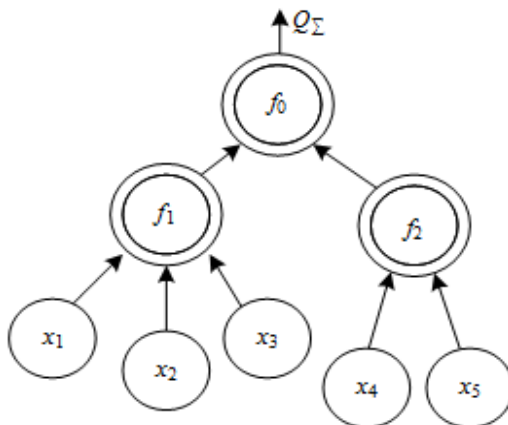


Рис. 3. Приклад ієрархічної нечіткої бази

Використання ієрархічних баз знань дозволяє невеликою кількістю "коротких" нечітких правил адекватно описати багатовимірні залежності "входи – вихід".

Обраний спосіб створення проектованої нечіткої системи полягає у виконанні нечіткого виведення для проміжних змінних з подальшою передачею чітких значень цих змінних у нечіткі системи наступного рівня ієрархії. Для реалізації цього способу необхідно виконати нечіткий логічний висновок для кожної нечіткої бази знань. Недолік цього способу полягає в тому, що над проміжними змінними  $u_1, u_2$  послідовно виконуються операції фазифікації та дефазифікації.

На практиці широко застосовують алгоритм нечіткого логічного висновку Такагі – Сугено – Канга (TSK). Принцип дії алгоритму TSK детально проаналізовано в роботі [2]. Особливість алгоритму полягає в тому, що правила у вигляді продукцій IF...THEN розглядаються за нечіткістю лише в частині IF, тоді як значення кожного продукційного правила визначається аналітичною функцією залежно від входів та стану досліджуваної системи [1].

Комплексна оцінка метаболізму міського середовища складається з агрегованих локальних оцінок, які характеризують різні аспекти функціонування міського середовища, які, у свою чергу, залежать від інших оцінок. Отже, уся конструкція комплексного індикатора ефективності міського середовища має форму ієрархії, яка дозволяє врахувати вплив багатьох аспектів функціонування міського середовища на різних рівнях ієрархії і, відповідно, на різних рівнях аналізу. На верхині ієрархії знаходиться загальна оцінка ефективності, нижній рівень ієрархії займають змінні, наприклад змінні, які подано в табл. 1.

Розглянемо сукупність вхідних показників стану міського середовища  $x_1, \dots, x_n$  (табл. 1). У таблиці показано належність кожного показника до однієї із трьох типів речовинно-енергетичних потоків: вхідний потік –  $N(t)$ , потік продукції –  $P(t)$ , потік втрат –  $L(t)$ .

Кожне значення показника речовинно-енергетичного потоку може належати до одного з трьох термів [11]:

- значення  $x_k$  може відповідати терму "мала кількість" з відповідною функцією належності  $\mu^1_k$ ;
- значення  $x_k$  може відповідати терму "середня кількість" з відповідною функцією належності  $\mu^2_k$ ;
- значення  $x_k$  може відповідати терму "велика кількість" з відповідною функцією належності  $\mu^3_k$

Кожна терм-множина  $A^j_k$  має відповідну функцію належності  $\mu^j_k$ , де  $j$ , які характеризують належність  $\mu$

$j_k$  до термів "мала кількість", "середня кількість" і "велика кількість".

Усього можна побудувати  $m = 3^n$  антецедентів продукційних правил TSK у вигляді [11, 17]:

$$R^{(1)} \text{ IF } x_1 \text{ IS } A^1_1 \text{ AND } x_2 \text{ IS } A^1_2 \text{ AND } \dots \\ \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A^1_n \text{ THEN } y_1 = f(x_1, \dots, x_n), \\ \dots \\ R^{(m)} \text{ IF } x_1 \text{ IS } A^m_1 \text{ AND } x_2 \text{ IS } A^m_2 \text{ AND } \dots \\ \dots \text{ AND } x_n \text{ IS } A^m_n \text{ THEN } y_m = f(x_1, \dots, x_n).$$

З використанням операції  $\Lambda$  (AND) система логічних висловлювань може бути переписана в більш компактному (векторному) вигляді:

$$\left[ \bigwedge_{k=1}^n (x_k = A^j_k) \right] \rightarrow y_i = f(x_1, \dots, x_n), i = \overline{1, m}.$$

На цьому етапі виконується фазифікація вхідних показників стану міського середовища  $x_1, \dots, x_n$ . На рис. 5 подано приклад фазифікації обсягів емісії CO<sub>2</sub>, виробленої приватним автотранспортом (див. табл. 1, змінна  $b_{29}$ ) з застосуванням відповідних терм-множин  $A^1_{b_{29}}$  – "мала кількість",  $A^2_{b_{29}}$  – "середня кількість",  $A^3_{b_{29}}$  – "велика кількість". Кожна з терм-множин характеризується відповідною функцією належності:

$$\mu^1_{b_{29}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq b_{29} \leq 1 \\ \frac{1.5 - b_{29}}{0.5}, & 1 \leq b_{29} \leq 1.5; \\ 0, & 1.5 \leq b_{29} \end{cases}$$

$$\mu^2_{b_{29}} = \begin{cases} 0, & b_{29} \leq 1 \\ \frac{b_{29} - 1}{0.5}, & 1 \leq b_{29} \leq 1.5 \\ \frac{2 - b_{29}}{0.5}, & 1.5 \leq b_{29} \\ 0, & 2 \leq b_{29} \end{cases};$$

$$\mu^3_{b_{29}} = \begin{cases} 0, & b_{29} \leq 1.5 \\ \frac{b_{29} - 1.5}{0.5}, & 1.5 \leq b_{29} \leq 2. \\ 1, & 2 \geq b_{29} \end{cases}$$

Кожна функція належності  $\mu^1_{b_{29}}, \mu^2_{b_{29}}, \mu^3_{b_{29}}$  породжує нормальні випуклі нечіткі множини  $A^1_{b_{29}}, A^2_{b_{29}}, A^3_{b_{29}}$  із відповідними ядрами  $Core(A^1_{b_{29}}) = 1, Core(A^2_{b_{29}}) = 1.5$  та  $Core(A^3_{b_{29}}) = 2$ .



Рис. 4. Приклад фазифікації обсягів емісії CO<sub>2</sub>, вироблених приватним автотранспортом

Математична модель оцінки ефективності MMC у вигляді продукційних правил TSK може бути подана у вигляді [11]:

$$R^{(i)}: \text{IF } \bigwedge_{k=1}^n (x_k \text{ IS } A_k^j) \text{ THEN } y_i = \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{P} f_k^j(x_k),$$

де  $i$  – кількість TSK – правил ( $i = \overline{1, m} / m = 3^n$ );  $n$  – кількість antecedentів продукцій;  $k$  – номер вхідної змінної;  $x_k$  – вхідна змінна ( $k = \overline{1, n}$ );  $A_k^j$  – нечітка множина з відповідною функцією належності

$$\mu_k^j (j \in \{1, 2, 3\});$$

$p_k$  – коефіцієнт важливості вхідної змінної  $x_k$ ;

$$P = \sum_{k=1}^n p_k,$$

де  $R$  – кількість досліджуваних підсистем, які впливають на підсумкову оцінку ефективності міського середовища.

Модель логічного висновку, яка складається з  $m$  TSK-правил може бути подана у вигляді:

$$y_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^m w_i} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \cdot \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{P} f_k^j(x_k)}{\sum_{i=1}^m w_i},$$

де  $\alpha$  – проміжний рівень обчислень після вхідних даних;  $w_i$  – вагові коефіцієнти, що активують кожне TSK-правило, якщо рівень активізації правила визначається логічним множенням (мінімум) від

$$\mu_{A_1^j}(x_1), \mu_{A_2^j}(x_2), \dots, \mu_{A_n^j}(x_n):$$

$$w_i = \begin{cases} \min \{ \mu_{A_1^j}(x_1), \mu_{A_2^j}(x_2), \dots, \mu_{A_n^j}(x_n) \} \\ \text{або} \\ \mu_{A_1^j}(x_1), \mu_{A_2^j}(x_2), \dots, \mu_{A_n^j}(x_n) \end{cases}.$$

Відповідно до вимоги інтегральної оцінки ефективності MMC значення  $E$  має задовольняти умову:

$$0 < E < 100.$$

Для досягнення цієї мети для кожної вхідної змінної  $x_k$  визначено три кусково-лінійні функції  $f_k^1, f_k^2, f_k^3$ .

При використанні кусково-лінійних функцій типу  $f(x) = a_0 + a_1 \cdot x_k, x_{i-1} \leq x_k \leq x_i$ , визначається інтервал, на який попадає значення  $x_k$  й обчислюється значення  $f(x)$ , використовуючи коефіцієнти  $a_0, a_1$  для цього інтервалу [12].

Наприклад, значення змінної  $b_{29}$  попадає в інтервал

$$\text{Core}(A_{b_{29}}^1) \leq b_{29} \leq \text{Core}(A_{b_{29}}^2).$$

У такому випадку коефіцієнти  $a_0, a_1$  обчислюються згідно з виразами

$$a_0 = f(\text{Core}(A_{b_{29}}^1)) - a_1 \cdot \text{Core}(A_{b_{29}}^1);$$

$$a_1 = \frac{f(\text{Core}(A_{b_{29}}^2)) - f(\text{Core}(A_{b_{29}}^1))}{\text{Core}(A_{b_{29}}^2) - \text{Core}(A_{b_{29}}^1)}.$$

На основі обчислених коефіцієнтів отримуємо значення кусково-лінійної функції для змінної  $b_{29}$ :

$$f_{b_{29}}^2(b_{29}) = f(\text{Core}(A_{b_{29}}^1)) - \frac{f(\text{Core}(A_{b_{29}}^2)) - f(\text{Core}(A_{b_{29}}^1))}{\text{Core}(A_{b_{29}}^2) - \text{Core}(A_{b_{29}}^1)}.$$

$$\cdot \text{Core}(A_{b_{29}}^1) + \frac{f(\text{Core}(A_{b_{29}}^2)) - f(\text{Core}(A_{b_{29}}^1))}{\text{Core}(A_{b_{29}}^2) - \text{Core}(A_{b_{29}}^1)} \cdot b_{29}.$$

Кожна кусково-лінійна функція  $f_k^i$  визначає ступінь впливу змінної  $x_k$  на підсумкове значення інтегральної оцінки ефективності MMC –  $E$  при виконанні antecedenta продукції "IF  $x_k$  IS  $A_k^j$ ". Кусково-лінійні функції  $f_k^i$  мають бути погоджені з відповідними функціями належності  $\mu_k^j$  та задовольняти обмеженням (на прикладі змінної  $b_{29}$ ):

$$b_{29}): f_{b_{29}}^1(x_k) = 0, \forall x_k \leq \text{Core}(A_{b_{29}}^1);$$

$$f_{b_{29}}^2(x_k) = 50, \quad \forall x_k \geq \text{Core}(A_{b_{29}}^2);$$

$$f_{b_{29}}^3(x_k) = 100, \quad \forall x_k \geq \text{Core}(A_{b_{29}}^3),$$

де  $0 \leq f_{b_{29}}^j(x_k) \leq 100$ .

На рис. 5 подано кусково-лінійні функції  $f_{b_{29}}^1, f_{b_{29}}^2, f_{b_{29}}^3$ , погоджені з відповідними функціями належності  $\mu_{b_{29}}^j$ . Синя лінія графіку відповідає функції  $f_{b_{29}}^1$ , зелена –  $f_{b_{29}}^2$ , червона лінія відповідає функції  $f_{b_{29}}^3$ , тобто найбільший внесок в інтегральну оцінку дає змінна  $b_{29}$  коли умова IF  $b_{29}$  IS  $A_{b_{29}}^1$  набуває значення "істина".

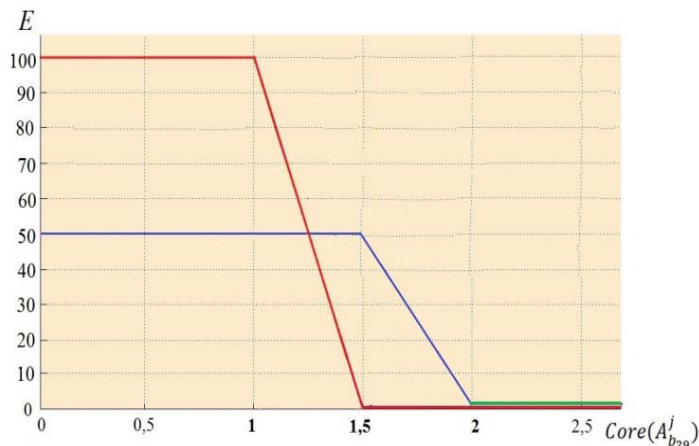


Рис. 5. Приклад кусково-лінійних функцій  $f_{b29}^j$ , які погоджені з відповідними функціями належності  $\mu_{b29}^j$ , зображеними на рис. 4

На рівні ієрархії  $\alpha+1$  обчислюється середнє арифметичне, зважене для отриманого набору дійсних чисел  $(y_1, \dots, y_i)^{\alpha+1}$  з позитивними дійсними ваговими коефіцієнтами  $(v_1, \dots, v_i)^{\alpha+1}$ :

$$\bar{y}^{\beta > \alpha + 1} = \left( \frac{\sum_{l=1}^v v_l \cdot y_l}{\sum_{l=1}^v v_l} \right)^{\alpha + 1},$$

де  $v$  – кількість виходів рівня ієрархії  $\alpha+1$ ;  $v_i$  – позитивні дійсні вагові коефіцієнти;  $y_i$  – обчислені проміжні значення, які характеризують кількість різного виду енергії,

речовини, інформації –  $N$ , негативної продукції –  $L$  та  $P$  – кількість продукції, яка використовується для забезпечення життєдіяльності.

На останньому рівні ієрархії за умови рівності вагових коефіцієнтів вираз для підсумкової оцінки ефективності ММС має вигляд:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^R v_i \bar{y}_i,$$

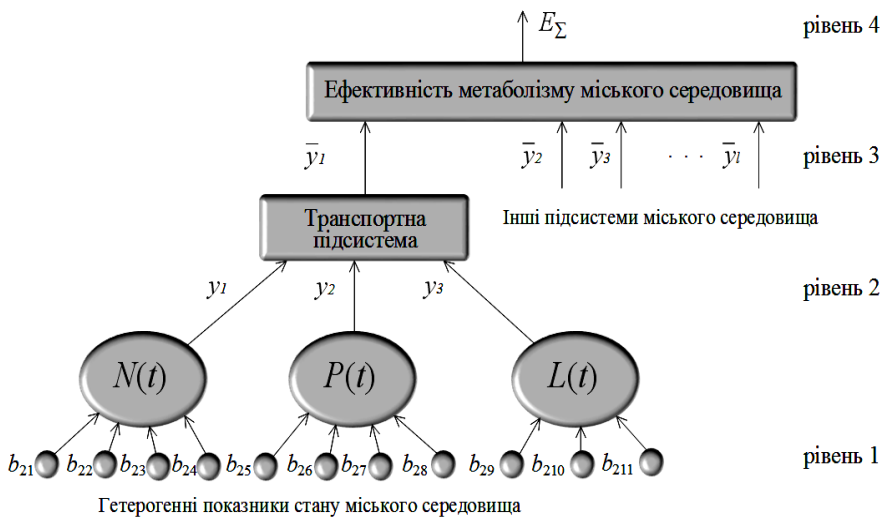


Рис. 6. Фрагмент ієрархічної структури отримання підсумкового значення комплексної оцінки ефективності метаболізму міського середовища (приклад транспортної підсистеми)

Фрагмент загальної структурної схеми обчислення оцінки ефективності ММС подано на рис. 6 (на прикладі транспортної підсистеми міського середовища).

Елементи ієрархічної структури, наведені на рис. 6, інтерпретуються наступним чином:

- корінь дерева – значення інтегральної оцінки ефективності метаболізму міського середовища ( $E_{\Sigma}$ );
- $\bar{y}_{1,2,3, \dots, \bar{y}_i}$  – дуги графа, які виходять із нетермінальних вершин – оцінки ефективності для кожної досліджуваної підсистеми міського середовища;

- $y_1, y_2, y_3$  дуги графа, які виходять із термінальних вершин – укрупнені фактори, що впливають на підсумкову оцінку ефективності ММС –  $N(t), L(t), P(t)$ ;
- термінальні вершини графа – гетерогенні показники стану міського середовища ( $b_{21}, b_{22}, \dots, b_{211}$ ).

Розглянуту методику оцінювання якості міського середовища реалізовано у програмному середовищі MatLab™ із застосуванням Fuzzy Logic Toolbox™ у кількості 450 операторів [15]. У роботі [15] розглянуто використання програми оцінювання ефективності метаболізму 32 міст Європейської Спільноти за 22 показниками.

Проведені в роботах [15, 16] дослідження показали, що в майбутньому оцінювання якості міського середовища має насамперед вимірюватись з огляду на ефективність метаболічних процесів. Показано, що невеликі та середні міста ЄС мають більш високі показники ефективності серед інших міст. Вони не залежать від таких показників, як щільність забудови, площа міста, щільність вулично-дорожньої мережі, а залежать від логістичних заходів, комунікаційних можливостей, збільшення сфери обслуговування, інтерактивності міських служб, зниження витрат на споживання ресурсів. Прикладом цього може бути місто Цюрих з населенням 350 тис. осіб, яке є сьогодні фінансовою столицею ЄС.

Сучасні міста України після зникнення централізованого планування опинилися в радикально іншому операційному середовищі й мають відповідати новим технологіям, неотернарній економіці та новим теоріям глобалізації [16].

У подальшому автори на прикладі пострадянського промислового міста Полтава проводять аналіз, спрямований на розуміння ефективності метаболічних процесів з точки зору виробництва та споживання енергії та ресурсів. Такий підхід дозволить сформулювати основні напрямки забезпечення сталого розвитку міського середовища в рамках нового підходу.

#### **Апробація оцінки якості міського середовища на прикладі міста Полтава**

Для підготовки вихідних даних у першу чергу були використані можливості геоінформаційної системи (ГІС) для формування геопросторових моделей і тематичних шарів відповідно до показників, які подані у таблиці 1. Таблиця налічує 37 базових параметрів, які характеризують стан трьох підсистем міського середовища. Базовим компонентом оцінки якості міського середовища є географічні (просторові) дані, подані у вигляді цифрових даних про просторові об'єкти і вміщують відомості про їх місцезнаходження, властивості та просторові і непросторові атрибути.

Одним із заходів взаємодії моделі оцінювання ефективності метаболізму міського середовища та ГІС є методика, яка пов'язує за допомогою інтерфейсу модель, розроблену в програмному середовищі MatLab з широко поширеною ГІС ArcGIS 10 [15]. Результатом такого зв'язку є те, що модельні дослідження (розрахунки) в MatLab-середовищі, можуть бути подані як деякі характеристики геоінформаційної системи з усіма перевагами географічного представлення та інтеграції з іншими характеристиками ГІС-додатку. Такий підхід забезпечує гнучкий спосіб використання характеристик обох програмних середовищ.

Вихідні дані для міста Полтава були сформовані на основі використання відкритих джерел:

"Полтава 2030. Інтегрований розвиток міста" (<http://www.2030.poltava.ua>), регіональні доповіді про стан навколишнього середовища в Полтавській області за 2015–2016 роки.

Показники охоплюють транспортну підсистему міста, містобудівну базу та соціально-економічну підсистему міста. Розподіл окремих показників стану міського середовища міста Полтава у вигляді геоінформаційних моделей подано на рис. 7, а–г.

Запропонований методичний підхід до оцінки якості міського середовища дозволяє зв'язати множину різних

аспектів міської системи з метою отримання інтегральної оцінки ефективності міста.

На рис. 9, 10 відображена чутливість оцінки ефективності міського середовища на прикладі 10-ї функціональної зони міста Полтави до змін у кількості твердих побутових відходів, що формуються населенням міста та від кількості енергії, що витрачається на опалення будівель і споруд.

Наведені графіки показують, що чутливість оцінки ефективності міського середовища різна в залежності від зміни досліджуваних змінних. Наприклад, зменшення твердих побутових відходів, що формуються населенням в умовах щільної міської забудови, на 0,1 тонн / осіб·рік забезпечує збільшення ефективності міського середовища на 5%, тоді як зменшення кількості споживаної енергії на опалення будівель та споруджень на 10 кВт·год / м<sup>2</sup> забезпечує збільшення ефективності міського середовища на 8–10%. На рис. 11 показана поверхня ефективності міського середовища залежно від кількості енергії, витраченої на опалення будівель та вироблення твердих побутових відходів, яку можна інтерпретувати як свого роду ландшафт ефективності середовища 10-ї функціональної зони міста Полтави.

У табл. 2 наведено результати оцінювання проміжних показників для кожної з досліджуваних підсистем міського середовища.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень** Міста є основними споживачами ресурсів та основними виробниками відходів у світі. Отже, міська галузь пропонує великий потенціал для зниження впливу людини на навколишнє середовище і світ. Перспективним підходом є міський метаболізм, який розглядає різні матеріальні, рухомі, водні та енергетичні потоки всередині міста. У статті запропоновано новий підхід до оцінки якості міського середовища на основі метаболічної концепції, який, на наш погляд, дозволяє значно розширити можливості геоінформаційного моніторингу. Наприклад, кластеризація міста на основі вибраних показників дозволить визначити кадастрові зони міста з аналогічними характеристиками або порівняти різні кадастрові зони за однаковими характеристиками (споживання енергії відносно щільності населення, частка використання відновлюваної енергії до валового внутрішнього продукту, річна витрата енергії промисловими підприємствами до обсягів емісії CO<sub>2</sub>, що виробляють підприємства тощо).

Запропонована методика комплексної оцінки якості міського середовища дозволить визначити різні сценарії для підвищення ефективності використання речовинно-енергетичних потоків у майбутньому або обґрунтувати виконання заходів, які дозволять зберегти продуктивність міського середовища (розв'язати задачу перерозподілу ресурсів міського середовища).

Необхідно зауважити, що майбутній напрямок удосконалення методики пов'язаний з тестуванням запропонованої моделі інтегральної оцінки якості міського середовища на прикладі інших міст України з порівнянням результатів оцінки з аналогічними результатами геоінформаційного моніторингу стану міст Європейського Союзу, виконаних у рамках програми SUME – Sustainable Urban Metabolism for Europe [7, 8].

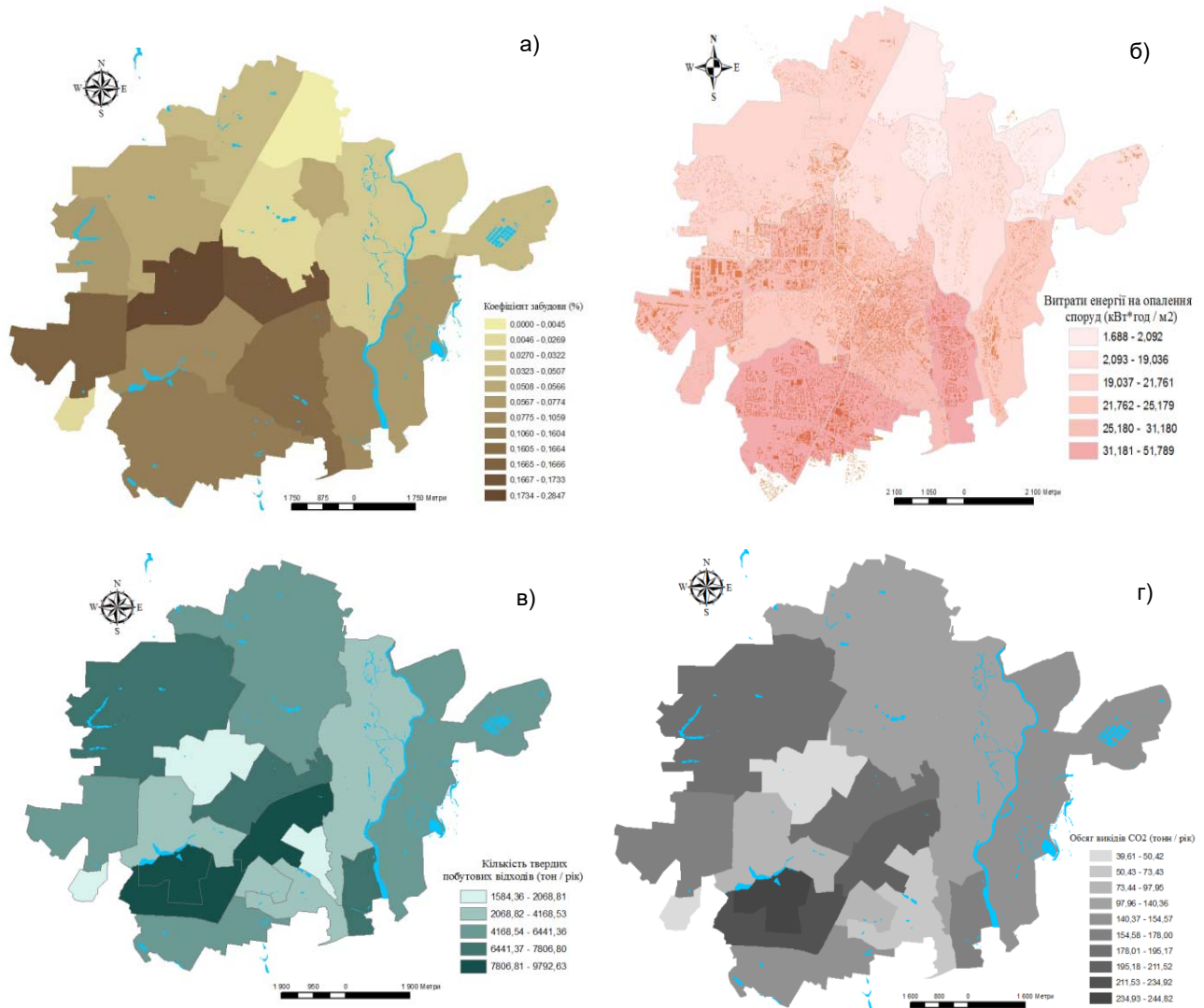
Таблиця 1. Показники стану міського середовища на прикладі окремих підсистем

Показники стану міського середовища		Позначення	N (t)	P(t)	L(t)	Одиниці виміру
1		2	3	4	5	6
1. Показники підсистеми – містоутворювальна база						
1.	1.1. Кількість населення	$a_{11}$				тис. осіб
2.	1.2. Щільність населення	$a_{12}$				$\frac{\text{осіб}}{\text{км}^2}$
3.	1.3. Загальна кількість житлових приміщень на території міста	$a_{13}$				$\text{М}^2$
4.	1.4. Питома річна витрата енергії на опалювання житлових будівель	$a_{14}$				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{рік}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{рік}}$
5.	1.5. Питоме водоспоживання в житлових будівлях	$a_{15}$				$\frac{\text{л}}{\text{особа} \cdot \text{доба}}$
6.	1.6. Загальне споживання електроенергії в житлових будівлях	$a_{16}$				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
7.	1.7. Частка використання відновлювальних джерел енергії	$a_{17}$				%
8.	1.8. Площа природних територій міста під особливою охороною	$a_{18}$				$\text{М}^2$
9.	1.9. Площа зелених насаджень міста	$a_{19}$				$\text{М}^2$
10.	1.10. Частка перероблених непромислових відходів	$a_{110}$				%
11.	1.11. Частка "екраноземів" і закритих ґрунтів на території міста	$a_{111}$				%
12.	1.12. Кількість муніципальних побутових відходів	$a_{112}$				$\frac{\text{кг}}{\text{особа} \cdot \text{доба}}$
13.	1.13. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , що одержані внаслідок опалення житлових будівель	$a_{113}$				$\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{рік}}$
14.	1.14. Обсяги емісії NO <sub>3</sub> , що одержані внаслідок опалення житлових будівель	$a_{114}$				$\frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{діб} \cdot \text{рік}}$
15.	1.15. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , що одержані внаслідок виробництва електроенергії	$a_{115}$				$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
16.	1.16. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , що одержані внаслідок складування твердих побутових відходів	$a_{116}$				$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{рік}}$
2. Показники транспортної підсистеми						
17.	2.1. Щільність вулично-дорожньої мережі	$b_{21}$				$\frac{\text{км}}{\text{км}^2}$
18.	2.2. Кількість автотранспортних засобів міста	$b_{22}$				од.
19.	2.3. Витрати енергії приватним автотранспортом	$b_{23}$				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
20.	2.4. Витрати енергії громадським автотранспортом	$b_{24}$				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{осіб} \cdot \text{рік}}$
21.	2.5. Інтенсивність транспортного потоку	$b_{25}$				%
22.	2.6. Середній пробіг легкового автотранспорту за рік	$b_{26}$				км
23.	2.7. Загальна протяжність мережі всіх видів громадського транспорту в місті	$b_{27}$				км
24.	2.8. Частка використання безвуглецевого транспорту ("зелений транспорт")	$b_{28}$				%
25.	2.9. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , вироблені приватним автотранспортом	$b_{29}$				$\frac{\text{тонн}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
26.	2.10. Обсяги емісії азоту NO <sub>3</sub> , вироблені легковим автотранспортом	$b_{210}$				$\frac{\text{кг}}{\text{авто} \cdot \text{рік}}$
27.	2.11. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , виробленої громадським автотранспортом	$b_{211}$				$\frac{\text{тонн}}{\text{осіб} \cdot \text{рік}}$
3. Показники соціально-економічної підсистеми						
28.	3.1. Загальна площа промислового призначення на території міста	$c_{31}$				%
29.	3.2. Питоме водоспоживання підприємствами міста	$c_{32}$				$\frac{\text{л}}{\text{доба}}$
30.	3.3. Річна витрата енергії промисловими підприємствами міста	$c_{33}$				$\frac{\text{кВт} \cdot \text{годин}}{\text{рік}}$
31.	3.4. Валовий внутрішній продукт	$c_{34}$				$\frac{\text{грн}}{\text{рік}}$
1		2	3	4	5	6
32.	3.5. Кількість місць додаткової праці	$c_{35}$				%
33.	3.6. Тривалість здорового життя, що очікується	$c_{36}$				роки
34.	3.7. Частка перероблених промислових відходів	$c_{37}$				%
35.	3.8. Кількість промислових відходів	$c_{38}$				$\frac{\text{тонн}}{\text{рік}}$
36.	3.9. Обсяги емісії CO <sub>2</sub> , що вироблені промисловими підприємствами міста	$c_{39}$				$\frac{\text{тонн}}{\text{рік}}$
37.	3.10. Обсяги емісії азоту NO <sub>3</sub> , що вироблені промисловими підприємствами міста	$c_{310}$				$\frac{\text{кг}}{\text{рік}}$

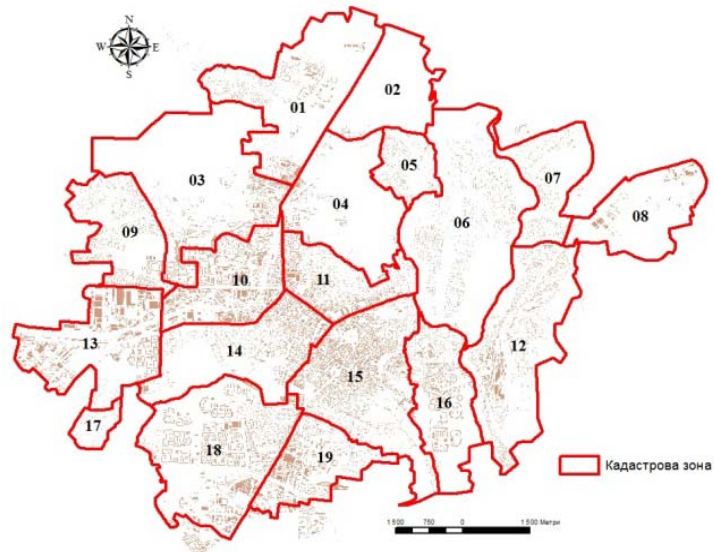
Таблиця 2. Комплексні показники стану міського середовища 10 функціональної зони м. Полтава

Комплексні оцінки стану міського середовища		N (t)	P(t)	L(t)	Оцінка ефективності метаболізму 10 функціональної зони м. Полтава ( $\xi_i$ )
1		2	3	4	6
1.	Транспортна підсистема	44	15,5	23,5	
2.	Підсистема містоутворюючої бази	15	34	35	
3.	Соціально-економічна підсистема	24	70	68	





**Рис. 7. Результати геоінформаційного моделювання стану міського середовища за показниками: а) коефіцієнт забудови (%), б) споживання енергії на опалення будівель, в) вироблення твердих побутових відходів, г) обсяги CO<sub>2</sub> внаслідок складування твердих побутових відходів**



**Рис. 8. Функціональне зонування території міста Полтава**

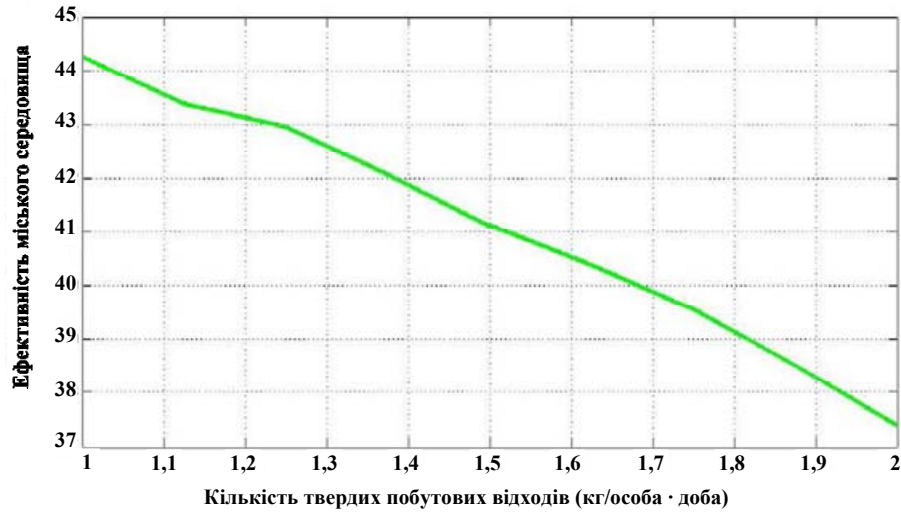


Рис. 9. Залежність ефективності метаболізму міського середовища 10-ї територіальної зони м. Полтава від кількості твердих побутових відходів

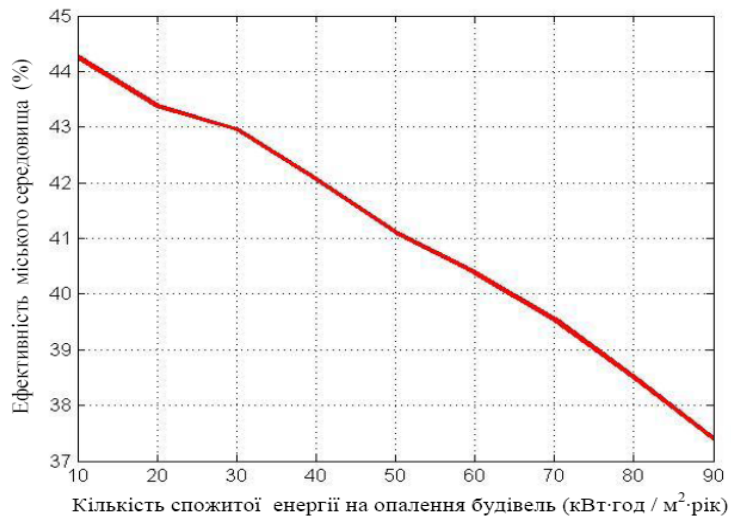


Рис. 10. Залежність ефективності метаболізму міського середовища 10-ї територіальної зони м. Полтава від кількості спожитої енергії на опалення будівель

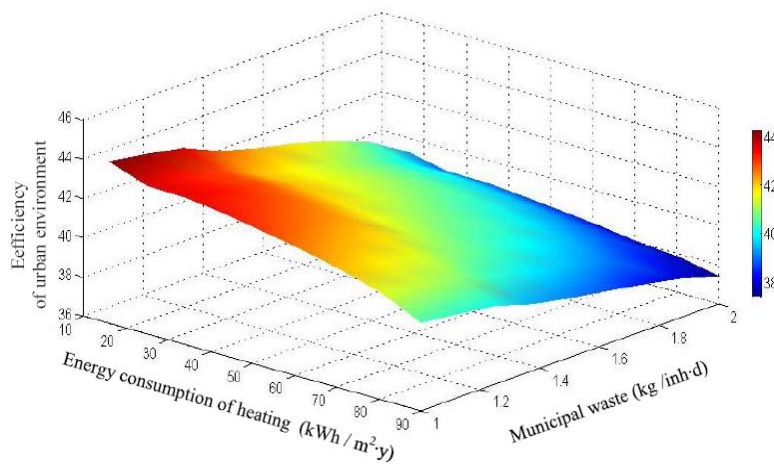


Рис. 11. Ландшафт ефективності міського середовища 10-ї територіальної зони м. Полтава залежно від кількості спожитої енергії на опалення будівель та вироблених твердих побутових відходів населенням міста

**Список використаних джерел:**

1. Большаков Б. Е. Научные основы проектирования в системе "природа – общество – человек". / Б. Е. Большаков. – М. ; СПб. ; Дубна : Гуманистика, 2002. – 616 с.
2. Караваева Н. В. Аналіз підходів до формування систем індикаторів сталого розвитку / Н. В. Караваева, Л. О. Левченко, Я. М. Трохименко // Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". – К. : КНУБА, 2011. – Вип. 7. – С. 126–131.
3. Тістол Н. В. Концептуальний підхід до оцінки якості житлового середовища / Н. В. Тістол // Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". – К. : КНУБА, 2013. – № 13. – С. 130–135.
4. Сорокин П. А. Человек, цивилизация, общество / П. А. Сорокин – М., 1992. – 234 с.
5. Патракеев І. М. Онтологічне дослідження міського середовища / І. М. Патракеєв // Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". – К. : КНУБА, 2015. – Ч. 1, № 23. – С. 159–168.
6. Чекмарев А. Н. Кваліметрія і управління качеством. Ч. 1. Кваліметрія : учебное пособие / А. Н. Чекмарев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та., 2010. – 172 с.
7. European Commission Directorate – General for Environment [Online]. Available from: <http://ec.europa.eu/environment/climat>.
8. Urban development and urban metabolism: A spatial approach [Online]. Available from: [http://sume.at/project\\_downloads](http://sume.at/project_downloads).
9. Bettencour L. A., Lobo J., Helbing D. Growth, Innovation, scaling, and the pace of life in cities Bettencour L. A. in Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, n. 104.
10. Butera F., Caputo P. Planning eco-cities, the case of Huai Rou New Town in Proceedings of the 3rd International Solar Cities Congress, Adelaide, 2008.
11. Paola C., Giulia P., Marco B. Urban metabolism analysis as a support to drive metropolitan development world. Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning. Proceeding Engineering.161 (2016). pp. 1588-1595.
12. Santamouris M. Cooling the cities. Rafrachir les Villes. Paris, Ecole des Mines de Paris, 2004.
13. Butera F. UN Habitat – State of the World's Cities 2008-2009. Harmonious cities, Earthscan, 2008.
14. Newman P., Kenworthy J. Cities and automobile dependence, in An International Sourcebook, Farnham: Gower, 1989.
15. Acebillo J., Maggi R. LNL La Nuova Lugano, Visioni, sfide e territorio della città. Lugano: CUP-IRE, 2008.
16. Allen S. Points and Lines: Diagrams and Projects for the City. New York: Princeton Architectural press, 2009.
17. Newman, P. Sustainability and cities: extending the metabolism model, in Landscape and urban planning, 2004, n. 4, pp. 219-226.

Надійшла до редколегії 03.04.18

**А. Михно, канд. техн. наук, доц.**

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина,

**И. Патракеев, канд. техн. наук**

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

*Предлагается подход к оценке состояния окружающей антропогенно-трансформированной среды, основанный на метаболической концепции городской среды. Совершенствование существующих и разработка новых индикаторов является важным этапом в направлении внедрения в практику геоинформационного мониторинга прогнозирования состояния городской среды, что позволит реализовать на практике концепцию устойчивого развития городской среды, которая сегодня является развитием учения В. И. Вернадского о ноосфере.*

*Ключевые слова: энергетический баланс, энтропия, свободная энергия, алгоритм Такаги-Сугено-Канга, вещественно-энергетические потоки, геоинформационный мониторинг.*

**O. Mikhno, PhD in Technical Sciences, Associate Professor**

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

**I. Patrakeiev, PhD in Technical Sciences**

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

### QUALITY EVALUATION METHOD OF THE CITY ENVIRONMENT

*The approach to the estimation of the condition of the surrounding anthropogenically-transformed environment, based on the metabolic concept of the urban environment is proposed. Improvement of existing and development of new indicators are an important stage in the implementation of the geoinformational monitoring of the forecasting of the state of the city environment in practice, which will realize in practice the concept of sustainable development of the urban environment, which is today the development of V.I. Vernadsky's doctrine of the noosphere.*

*Keywords: energy balance, entropy, free energy, Takagi-Sugeno-Kang algorithm, material-energy flows, geoinformational monitoring.*