
ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЛАНУВАННЯ ТА ОБЛІКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ГРОМАДАХ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

М.В. БІГУН,

аспірант,

E-mail: mykola.v.bihun@lpnu.ua

ORCID: 0009-0009-1215-0544

Л.Л. ПОЛЯКОВСЬКА,

кандидат технічних наук,

E-mail: liudmyla.l.poliakovska@lpnu.ua

ORCID: 0009-0001-7942-7757

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. Стаття визначає методичні засади геоінформаційного супроводу планування та обліку енергетичних ресурсів на рівні територіальних громад. Запропоновано інтегрувати просторові масиви, цифрові реєстри комунальної інфраструктури, системи оперативного моніторингу та аналітичні інструменти управління. Окремо проаналізовано можливості геоінформаційних платформ під час інвентаризації об'єктів, фіксації втрат енергоресурсів та підготовки інвестиційних проєктів. Метою роботи є створення прикладної моделі застосування геоінформаційних технологій у процесі планування, моніторингу та обліку енергоресурсів на рівні громади. Увагу спрямовано на об'єднання відомостей про обсяги споживання, стан інженерних мереж, резерви локальної генерації та ймовірність аварійних ситуацій. Дослідження базується на чинних нормативних актах, офіційній статистиці, відкритих геопросторових матеріалах, технічних характеристиках мереж та реєстрах об'єктів комунального господарства. Методологічна частина включає системний аналіз, просторове моделювання, економічне пріоритезування заходів, сценарні розрахунки та порівняльну оцінку управлінських варіантів в сфері енергоспоживання. Автори аргументують необхідність формування єдиної цифрової бази енергетичних ресурсів територіальної громади. У статті представлено інструменти для візуалізації ділянок з надмірним споживанням, розрахунку технічних втрат у мережах та визначення майданчиків для розміщення сонячних, вітрових і біоенергетичних установок. Запропоновано метод відбору інвестиційних проєктів

з урахуванням строку окупності, технічної доступності та впливу на довкілля. Доведено ефективність поєднання геоінформаційної системи з лічильниками віддаленого зчитування та місцевим геопорталом. Перспективним напрямом подальшої роботи вважається розробка цифрових двійників муніципальної інфраструктури. Доцільно також дослідити можливості штучного інтелекту у прогнозуванні енергетичних навантажень. Важливим завданням залишається створення галузевих стандартів для обміну просторовими даними.

Ключові слова: геоінформаційні системи, енергетичні ресурси, територіальна громада, енергоефективність, просторове планування, сталий розвиток.

Актуальність

Енергетична стійкість громад сьогодні все більше залежить від того, наскільки якісними є просторові дані та наскільки точним є технічний облік. Місцеві мережі теплопостачання, електропостачання, водопідготовки та зовнішнього освітлення функціонують у складних умовах, де навантаження розподіляється нерівномірно, а втрати ресурсів часто залишаються непоміченими. Звичайні системи звітності фіксують уже готовий результат, однак не дають змоги побачити, де саме в просторі виникає проблема. Саме тому геоінформаційні техніки, цифрові карти та об'єднані реєстри інфраструктури стають цілком практичним інструментом. Вони допомагають громадам більш точно визначати місця надмірних витрат, оцінювати можливості локальної генерації та узгоджувати інвестиційні програми.

У багатьох громадах геодезичний моніторинг, енергетичний облік, бюджетне планування та аварійне реагування досі існують як окремі управлінські контури. Така роз'єднаність знижує ефективність інвестицій, ускладнює модернізацію мереж і сповільнює відновлення територій після криз. Ми припускаємо, що об'єднання GIS-платформ, систем smart-metering,

просторової аналітики та цифрових карт ризику здатне сформувавати нову модель розпорядження енергетичними ресурсами громади.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останнім часом дослідники дедалі більше уваги приділяють цифровому управлінню енергетичними ресурсами на рівні окремих територій. У роботі Ачкасова А. та ін. [2] наведено результати вивчення геопорталів територіальних громад та особливостей їхнього інформаційного наповнення. Автори показують, що просторові сервіси роблять управлінські дані доступнішими. Водночас питання інтеграції таких платформ із системами енергетичного обліку залишаються розкритими неповністю. Дослідження Ажаман І. та ін. [1] висвітлює міжнародний досвід енергетичного менеджменту та можливості його адаптації в Україні. Управління споживанням ресурсів, як доводять автори, дає відчутний економічний ефект. Однак механізми, які дають змогу деталізувати управлінські рішення територіально, тобто на рівні окремої громади, потребують подальшого уточнення.

У публікації Суходолі О. М. [7] запропоновано модель ризик-орієн-

тованого забезпечення енергетичної безпеки держави. Автор переконливо доводить важливість прогнозування загроз і резервування ресурсів. Але аспекти локального картографування ризиків для конкретних мережевих об'єктів інфраструктури залишилися невирішеними. Робота Буономано А. та ін. [8] представляє результати GIS-планування енергетичних спільнот у містах. Дослідники показують, що просторовий вибір зон генерації, накопичення та балансування попиту є ефективним. Проте чи можна адаптувати такі підходи до українських громад із їхніми зношеними мережами, це питання потребує окремого вивчення. У дослідженні Кочанек А., Генерович А., Зацлона Т. [12] розкрито роль геоінформаційних систем у природоохоронному менеджменті та розвитку відновлюваної енергетики. Автори слушно наголошують на міжгалузевому характері GIS-рішень. Водночас поєднання екологічних і бюджетних критеріїв у муніципальному плануванні висвітлено недостатньо.

У науковій публікації Нассіф В. Г., Аль-Тімімі Й. К., Ельхмаїді Д. [16] обґрунтовано використання методу GIS-АНР для вибору майданчиків під сонячну генерацію. Автори доводять високу точність багатокритеріального відбору територій. Разом із тим залишаються відкритими питання, як сумісно ранжувати сонячні, біоенергетичні та когенераційні проекти в межах однієї громади. Робота Карпаша М. та ін. С. [11] присвячена планам енергетичної безпеки малих муніципалітетів України. Дослідники показують необхідність сценарного планування та прогнозування ресурсних дефіцитів. Однак тема цифрового моніторингу в реальному часі розкрита тут лише частково. У до-

слідженні Зайченка С., Бориченка О., Трачука А. [17] наведено геоінформаційний аналіз розвитку відновлюваної енергетики України з урахуванням віддаленості споживачів. Автори показують, що транспортний і мережевий фактори помітно впливають на доцільність реалізації проєктів. Усе це дає підстави вважати, що актуальним є проведення окремого дослідження в розрізі геоінформаційного забезпечення управління енергетичними ресурсами в громадах.

Мета дослідження. Мета статті – розробити прикладні методичні підходи для впровадження геоінформаційного забезпечення у процеси планування та обліку енергетичних ресурсів на рівні громад.

Матеріали і методи дослідження

Джерельну основу дослідження становлять нормативні документи енергетичного сектору, муніципальні програми розвитку, відкриті геопросторові дані та статистичні матеріали про споживання ресурсів. До складу цього масиву увійшли картографічні шари територій громад, технічні параметри мереж, дані про бюджетні установи, а також відомості щодо локальної генерації енергії. Для аналітичної обробки застосовано системний підхід, порівняльний аналіз і просторове моделювання. За допомогою GIS-інструментів вдалося визначити зони перевантаження мереж, ділянки, а також території з підвищеним ризиком.

Результати дослідження та їх обговорення

Процеси переходу громад до точного управління енергетичними ре-

сурсами, напряму залежать від якості просторових даних. Це пов'язано з тим, що енергетичний облік довгий час розвивався окремо від містобудівного кадастру, а інженерна інфраструктура часто описувалася локальними схемами підприємств. Єдина цифрова база енергетичних ресурсів громади має будуватися на інтеграції кількох джерел. Сюди слід включити державний земельний кадастр, містобудівну документацію, топографічні плани, супутникові знімки та результати GNSS-зйомки. До цієї системи додаються показники фактичного споживання електроенергії, тепла, води, палива. Рівень наповнення бази можна оцінювати коефіцієнтом просторової готовності:

$$K_{pg} = \frac{N_v}{N_z} \cdot 100\% \quad (1)$$

де:

K_{pg} – коефіцієнт просторової готовності бази, %;

N_v – кількість верифікованих об'єктів;

N_z – загальна кількість об'єктів реєстру.

У разі перевищення значення показника за 90 %, громада вже має працездатну цифрову модель. Якщо значення нижче, система ще нестійка, хоча формально існує.

Наступний блок стосується геодезичного позиціонування об'єктів енергоспоживання. Йдеться не лише про будівлі шкіл чи лікарень. Потрібно фіксувати котельні, теплові пункти, насосні станції, трансформаторні підстанції, свердловини, вузли освітлення, аварійні ділянки мереж [16, с. 83]. Без точних координат технічне обслуговування стає реактивним (рис. 1).

Енергоємність просторової одиниці доцільно визначати за формулою:

$$E_d = \frac{Q_{el} + Q_{th} + Q_f}{S} \quad (2)$$

де:

E_d – інтегральна енергоємність території, кВт•год/м²;

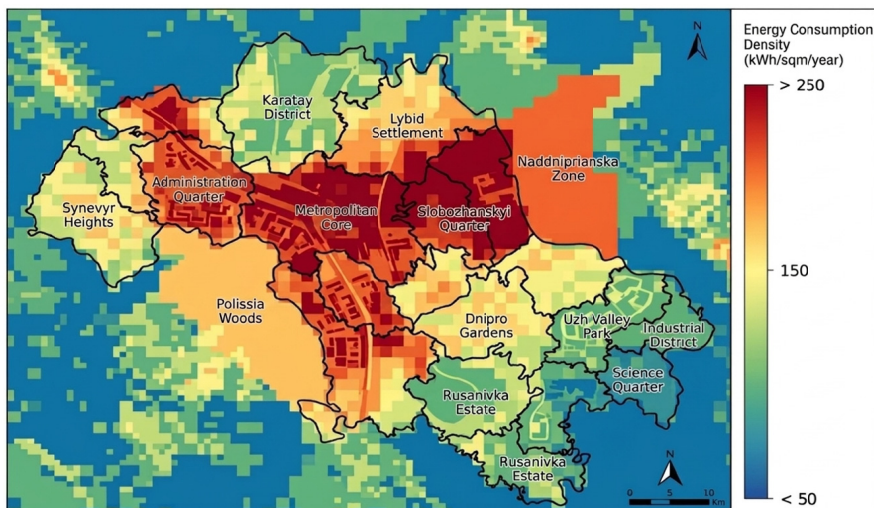


Рис. 1. Просторова карта щільності енергоспоживання (кВт/м²/рік) у міських районах (побудовано авторами в середовищі SolidWorks)

1. Типова структура цифрової бази енергетичних ресурсів територіальної громади [3, 4]

№ з/п	Категорія об'єктів	Джерело даних	Основний параметр обліку	Просторовий формат	Частота оновлення	Пріоритет цифровізації
1	Заклади освіти	Балансоутримувач	кВт•год/рік	Точка/полігон	Щомісячно	Високий
2	Медичні заклади	Управління охорони здоров'я	Г кал/рік	Полігон	Щомісячно	Високий
3	Адмінбудівлі	Виконком громади	кВт•год/м²	Полігон	Щоквартально	Середній
4	Котельні	КП тепломереж	Потужність, МВт	Точка	Щоквартально	Високий
5	Вуличне освітлення	КП благоустрою	Кількість світлоточок	Лінія/точка	Щомісячно	Високий
6	Підстанції	Оператор мереж	кВт	Точка	Щорічно	Високий
7	Водонасосні станції	Водоканал	кВт•год/добу	Точка	Щомісячно	Високий
8	Тепломережі	КП тепломереж	Втрати, %	Лінія	Щорічно	Високий

Q_{el} – споживання електроенергії;
 Q_{th} – теплова енергія у приведеному еквіваленті;

Q_f – паливні ресурси;

S – площа забудови або функціональної зони.

Такий індикатор добре виявляє квартали з аномально високими витратами. Перед переходом до реєстру доцільно порівняти структуру об'єктів, які зазвичай включаються до цифрової бази громади (табл. 1).

GIS-реєстр енергетичної інфраструктури повинен працювати як система рішень, а не як архів. Для кожного об'єкта фіксуються технічний стан, рік введення, знос, балансоутримувач, енерговитрати, фотофіксація, ремонтна історія та прогноз заміни. Це переводить громаду від інтуїтивного ремонту до керованого інвестиційного циклу. Індекс пріоритетності модернізації доцільно визначати так:

$$P_m = 0,45Z + 0,35L + 0,20C \quad (3)$$

де:

P_m – пріоритет модернізації;

Z – рівень зносу;

L – втрати енергії;

C – критичність об'єкта для населення.

Чим вище значення показника, тим раніше об'єкт включають до програми оновлення. Варіанти того, як методика працює на практиці, доречно показати на прикладі Криворізької міської громади. Територія громади перевищує 430 км², а місто має видовжену структуру забудови. Це означає довгі інженерні коридори, значну протяжність зовнішнього освітлення та високі витрати на диспетчеризацію. За відкритими даними міської ради у громаді функціонують десятки комунальних підприємств, велика мережа закладів освіти та охорони здоров'я, а транспортна інфраструктура охоплює трамвайні й тролейбусні системи. Для такої території без GIS-реєстру витрати на координатію неминуче зростають. Практичний кейс можна подати через модель квартального аналізу. Якщо один район має 14 бюджетних будівель із

2. Матриця пріоритетності модернізації енергетичних об'єктів громади [5, 14]

№ з/п	Тип об'єкта	Знос, %	Втрати енергії, %	Індекс пріоритетності	Рекомендована дія
1	Школа старої забудови	71	24	0,64	Термомодернізація
2	Лікарняний корпус	66	21	0,58	Модернізація вузла обліку
3	Котельня квартальна	79	18	0,67	Заміна обладнання
4	Насосна станція	74	16	0,60	Частотне регулювання
5	Вуличне освітлення	48	27	0,51	LED-модернізація
6	Адмінбудівля	53	14	0,43	Автоматизація режимів
7	Тепломережа ділянка	81	29	0,74	Капітальна заміна
8	Спортивний комплекс	59	19	0,49	Локальна санація

середнім споживанням 182 кВт•год/м² на рік, а сусідній район 11 будівель з 126 кВт•год/м², система одразу показує зону втрат. Далі перевіряються утеплення, тепловузли, освітлення, режим експлуатації [6, с. 128-129]. В таблиці 2 наведено приклад аналітичної матриці, яку громада може застосовувати для формування щорічної програми енергоефективності.

Окремої уваги потребує моніторинг у часі. Статична карта швидко старіє. Тому базу даних варто поєднувати з автоматичним імпортом показників лічильників, мобільними обстеженнями та щорічною геодезичною ревізією мереж. Тоді інформація не накопичує похибки. Ефект цифрового управління можна оцінити формулою економії:

$$K_e = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

де:

K_e – економія витрат, %;

C_0 – витрати до впровадження GIS;

C_1 – витрати після впровадження.

У муніципальних проєктах подібний показник часто формується через менші аварійні ремонти,

скорочення втрат і точніше бюджетування. Це, як видається, найцінніший ефект цифрової геодезичної моделі громади. Коли карта починає працювати як управлінський інструмент, ресурси вже не розпорошуються, а концентруються у проблемних точках. Саме тому геоінформаційний аналіз потрібен не як додаток до статистики, а як окрема система виявлення втрат. Коли карта поєднана з показниками споживання, приховані дисбаланси стають видимими. Перший етап полягає у картографуванні зон надмірного енергоспоживання [2]. Для цього територію громади поділяють на аналітичні комірки, наприклад 250 × 250 м або 500 × 500 м. Далі до кожної комірки прив'язують річне споживання електроенергії, тепла, природного газу, кількість мешканців, площу забудови та протяжність мереж [9, с. 4]. Після цього формується інтегральний індекс навантаження.

$$I_{en} = \frac{\alpha Q_{el} + \beta Q_{th} + \gamma Q_g}{S^{0.65} \cdot P^{0.35}} \quad (5)$$

де:

I_{en} – індекс енергетичного навантаження території;

Q_{el} – річне споживання електроенергії, кВт•год;

Q_{th} – теплова енергія, Гкал у приведеному еквіваленті;

Q_g – споживання газу, м³ у енергетичному перерахунку;

S – площа забудови, м²;

P – чисельність населення;

α, β, γ – вагові коефіцієнти ресурсу.

Комірки з перевищенням середнього значення на 25–30 % формують карту критичних зон. Друга задача стосується втрат у теплових та електричних мережах. Вони нерідко розосереджені по дрібних ділянках, тому традиційна звітність згладжує ризики. У GIS середовище вводять шари трубопроводів, кабельних трас, вік мереж, аварійність, температуру носія, опір ліній. Після цього формується просторовий коефіцієнт втрат.

$$K_{loss} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i \cdot Z_i \cdot \Delta T_i}{D_i} \right) + \sum_{j=1}^m (R_j I_j^2 t_j) \quad (6)$$

де:

K_{loss} – інтегральний показник втрат;

L_i – довжина теплової ділянки;

Z_i – коефіцієнт зносу;

ΔT_i – температурний перепад;

D_i – діаметр трубопроводу;

R_j – електричний опір лінії;

I_j – сила струму;

t_j – час навантаження.

Після розрахунку система показує ділянки, де модернізація дасть найбільший ефект за одиницю вкладень. Перед подальшим моделюванням доцільно структурувати технічні параметри, що використовуються при картографуванні енерговитрат і втрат мереж (табл. 3) [12].

Наступний блок пов'язаний із GIS-моделюванням придатних територій для локальної генерації. Для сонячних станцій використовують інсоляцію, ухил рельєфу, орієнтацію схилів, віддаленість від підстанцій, обмеження забудови та екологічні режими. Для вітрових об'єктів додають розу вітрів, шорсткість поверхні, санітарні зони та аеронавігаційні обмеження. Біоенергетика, власне, орієнтується на логістику сировини, транспортну доступність і відстань до споживача тепла [17, с. 62]. При-

2. Технічні параметри GIS-аналізу зон надмірного енергоспоживання та мережевих втрат (розроблено авторами)

№ з/п	Параметр	Одиниця виміру	Джерело даних	Просторовий рівень	Період оновлення
1	Споживання електроенергії	кВт•год/рік	Оператори обліку	Будівля	Щомісячно
2	Споживання тепла	Гкал/рік	Теплопостачальник	Будівля	Щомісячно
3	Протяжність тепломереж	км	Технічний паспорт	Квартал	Щорічно
4	Аварійність мереж	випадків/рік	Комунальне підприємство	Ділянка	Щоквартально
5	Щільність забудови	м²/га	Кадастр	Квартал	Щорічно
6	Вік обладнання	років	Балансоутримувач	Об'єкт	Щорічно
7	Навантаження трансформаторів	%	Енергокомпанія	Підстанція	Щомісячно
8	Втрати напруги	%	Диспетчерський облік	Лінія	Щомісячно

датність ділянки доцільно визначати методом зваженого накладання:

$$S_{fit} = \sum_{k=1}^r w_k x_k - \sum_{h=1}^q p_h y_h \quad (7)$$

де:
 S_{fit} – інтегральний бал придатності;
 w_k – вага позитивного критерію;
 x_k – нормоване значення позитивного фактора;
 p_h – вага обмеження;
 y_h – нормоване значення негативного фактора.

Ділянки з найвищим балом потрапляють до першої черги інвестиційного розгляду. Але проблема в тому, що висока природна придатність не завжди означає високу економічну доцільність. Саме тому після технічного відбору запускають фінансовий фільтр. Для цього розраховують просторовий індекс окупності:

$$R_{pay} = \frac{CAPEX + \sum OPEX_t (1+r)^{-t}}{\sum CF_t (1+r)^{-t}} \quad (8)$$

де:
 R_{pay} – індекс окупності;
 $CAPEX$ – первинні капітальні витрати;
 $OPEX_t$ – операційні витрати року t ;

CF_t – грошовий потік року t ;
 r – ставка дисконту.

Якщо індекс менший за одиницю, проект має прийнятний фінансовий профіль. Перед остаточним вибором інвестицій громада має зів'язати технічну придатність із доступністю підключення та екологічним ефектом. Саме тут GIS стає інструментом стратегічного ранжування (табл. 4).

Третій етап стосується просторової пріоритезації інвестиційних проєктів. Тут оцінюється не один показник, а пакет параметрів: окупність, кількість споживачів, резерв потужності, екологічний ефект, технічний ризик, доступність землі. Якщо працювати без карти, конфлікти виникають майже гарантовано. Коли ж рішення спирається на просторову матрицю, управлінська логіка стає прозорішою [15, с. 492]. Комплексний рейтинг можна визначати так:

$$Q_{inv} = 0.30F + 0.25A + 0.20E + 0.15T + 0.10R \quad (9)$$

де:
 Q_{inv} – інтегральний рейтинг проєкту;
 F – фінансова ефективність;
 A – доступність інфраструктури;
 E – екологічний ефект;
 T – технічна готовність;

4. Матриця технічної пріоритезації локальних енергетичних проєктів громади (розроблено авторами)

№ з/п	Тип проєкту	Технічний бал, од.	Відстань до мережі, км	Скорочення CO ₂ , т/рік	Пріоритет
1	Наземна СЕС 5 МВт	8,9	0,8	4120	Високий
2	Дахова СЕС школи	7,1	0,1	96	Середній
3	ВЕС локальна 3 МВт	8,4	1,6	3580	Високий
4	Біокотельня 2 МВт	7,8	0,4	2140	Високий
5	Газопоршнева когенерація	6,5	0,3	980	Середній
6	Акумуляторний модуль	7,3	0,2	0	Середній
7	Теплові насоси ЖКГ	7,9	0,2	620	Високий
8	МікроСЕС для водоканалу	6,9	0,1	74	Середній

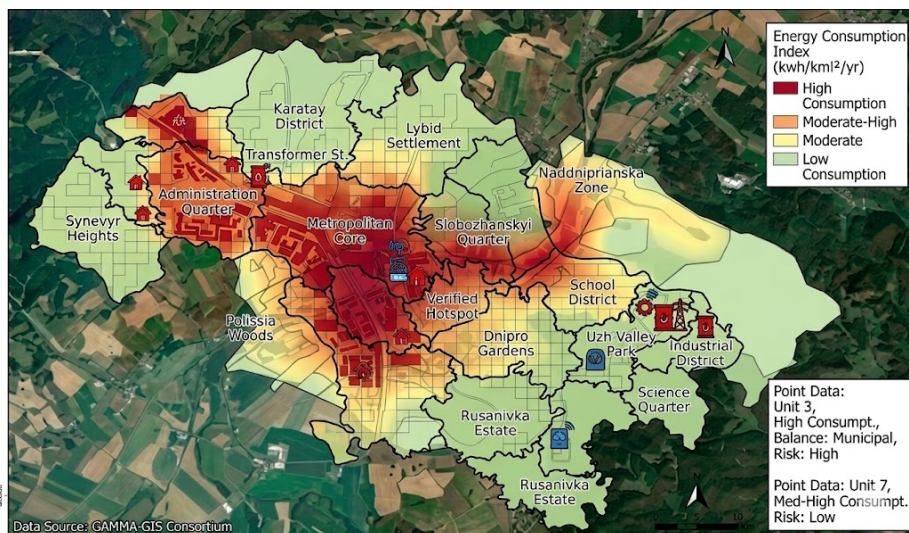


Рис. 2. Теплова карта споживання енергії: ГІС-аналіз міста (побудовано авторами в середовищі SolidWorks)

R – ризик реалізації.

Дані надходять із затримкою, втра-ти накопичуються раніше, а ремонтні рішення приймаються запізно. Саме тому геодезичний моніторинг сьогодні переходить у режим безперервного спостереження. Координати об'єкта, часовий ряд споживання, технічний стан обладнання та просторові зв'язки мають працювати як єдина система.

Інтеграція GIS-платформи з smart-metering починається з прив'язки кожного вузла обліку до координатної основи громади. Лічильник без координати дає лише число [10]. Лічильник у геоінформаційній системі дає контекст: район, балансоутримувач, тип забудови, підстанцію живлення, аварійні ризики (рис. 2).

Для поточного контролю використовується агрегований показник миттєвого відхилення навантаження:

$$D_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{it} - \bar{q}_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (10)$$

де:

D_t – інтегральне відхилення у момент часу t ;

q_{it} – поточне споживання об'єкта i ;

$\bar{q}_i$ – середнє нормативне споживання;

σ_i – стандартне відхилення ряду;

n – кількість контрольованих вузлів.

Якщо показник перевищує порогове значення, диспетчер одразу бачить сектор аномального навантаження. Система реального часу має поєднувати лічильники електроенергії, тепла, води, газу, стан насосного обладнання та параметри напруги. До речі, окремий сенс має інтеграція з GNSS-датчиками на мобільних бригадах. Це дає контроль часу реагування, маршруту руху та фактичного місця виконання робіт.

Перед розгортанням цифрового диспетчерського контуру доцільно зафіксувати набір технічних параметрів, які громада повинна збирати автоматично. Без цього потік да-

5. Технічні параметри інтеграції GIS-платформи з системами smart-metering (розроблено авторами)

№ з/п	Параметр моніторингу	Одиниця виміру	Джерело сигналу	Частота оновлення	Просторовий рівень
1	Активна потужність	кВт	Електролічильник	15 хвилин	Будівля
2	Теплове навантаження	Гкал/год	Тепловузол	15 хвилин	Будівля
3	Тиск у мережі	бар	Датчик тиску	5 хвилин	Ділянка
4	Напруга фази	В	Аналізатор мережі	1 хвилини	Підстанція
5	Витрата води	м³/год	Водомір	15 хвилин	Об'єкт
6	Температура носія	°С	Температурний датчик	5 хвилин	Тепломережа
7	Час прибуття бригади	хвилин	GPS-трекер	Подія	Район
8	Статус обладнання	0/1	Контролер PLC	Онлайн	Об'єкт

них швидко перетворюється на шум (табл. 5).

Геопортал громади виступає наступним рівнем управління. Якщо внутрішня GIS-система орієнтована на операторів, то геопортал працює для керівництва, фінансових підрозділів і мешканців. Тут відображаються виконані ремонти, споживання бюджетних установ, динаміка економії, статус інвестиційних проєктів, завантаження мереж [13, с. 224]. Але проблема в тому, що без стандартизації візуалізації керівник бачить красиву карту, а не рішення.

Для оцінки виконання програм енергоефективності доцільно застосовувати індекс бюджетної результативності:

$$B_{ef} = \frac{\sum_{j=1}^m (S_j \cdot \eta_j)}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad (11)$$

де:

B_{ef} – індекс бюджетної результативності;

S_j – річна економія коштів заходом j ;

η_j – коефіцієнт досягнення цільового ефекту;

C_j – бюджетні витрати на захід;

m – кількість проєктів.

Чим вищий показник, тим точніше бюджет перетворюється на реальний ресурсозберігаючий результат. У геопорталі корисно відображати не лише завершені роботи, а й прогноз касових потреб до кінця року. Тоді фінансовий департамент бачить не залишок коштів, а майбутню напругу бюджету. Саме через це цифрова карта дедалі частіше стає інструментом казначейського планування. Окремий блок стосується цифрових карт ризиків енергетичної безпеки. Тут поєднуються аварійність мереж, ступінь зносу, резерв потужності, щільність населення, критичні об'єкти, логістична доступність ремонтних служб [11]. У разі надзвичайної події громада повинна знати, яка ділянка найбільш вразлива, а яка може тимчасово прийняти навантаження. Інтегральний ризик території доцільно визначати так:

$$R_z = \lambda_1 A + \lambda_2 Z + \lambda_3 P + \lambda_4 C - \lambda_5 R_s \quad (12)$$

де:

R_z – ризик зони;

A – аварійність мереж;

Z – ступінь зносу;

P – щільність споживачів;

C – критичність соціальних об'єктів;

6. Матриця цифрового ризик-аналізу та сценаріїв відновлення енергетичної інфраструктури (розроблено авторами)

№ з/п	Тип ризику	Ймовірність	Наслідок для системи	Час реагування	Пріоритет дії
1	Пошкодження підстанції	Висока	Втрата живлення району	До 30 хв	Критичний
2	Прорив тепломережі	Висока	Зниження температури сектору	До 1 год	Високий
3	Перевантаження фідера	Середня	Аварійне відключення	До 15 хв	Високий
4	Відмова насосної станції	Середня	Перебої водопостачання	До 30 хв	Високий
5	Кібератака на SCADA	Низька	Втрата керування	Негайно	Критичний
6	Локальний дефіцит палива	Середня	Обмеження генерації	До 6 год	Середній
7	Обрив зв'язку датчиків	Середня	Втрата телеметрії	До 2 год	Середній
8	Масове зледеніння мереж	Низька	Множинні пошкодження	До 12 год	Високий

R_s – резервна спроможність мережі;

$\lambda 1... \lambda 5$ – вагові коефіцієнти.

Зони з максимальним значенням потрапляють до першої черги модернізації та резервування. Перед розробленням сценаріїв післякризового відновлення доцільно структурувати типи ризиків і відповідні технічні реакції громади (табл. 6).

Післякризове відновлення повинно будуватися не за принципом черговості заявок, а за просторовим рейтингом критичності. Для цього вводиться показник відновлювально-го пріоритету:

$$V_p = \frac{N_c \cdot W_s \cdot T_r^{-1}}{C_r^{0.5}} \quad (13)$$

де:

V_p – пріоритет відновлення;

N_c – кількість споживачів;

W_s – вага соціальної значущості;

T_r – очікуваний час ремонту;

C_r – ресурсна вартість робіт.

Чим більше значення індексу, тим раніше об'єкт включають у графік аварійного відновлення. Те, як працює така система, добре видно під

час пікових навантажень. GIS показує осередок проблеми, smart-metering підтверджує параметри, геопортал відкриває бюджетний ресурс, ремонтна служба отримує маршрут. Отже, кілька раніше роз'єднаних процесів стають одним контуром управління.

Висновки і перспективи

Отримані результати дають підстави стверджувати, що ефективність управління енергетичними ресурсами громади помітно зростає, коли геодезичні дані, цифрове картографування та автоматизований облік споживання об'єднано в єдиному інформаційному середовищі. Саме завдяки такому поєднанню просторових координат і технічних показників стає можливим завчасно виявляти приховані осередки перевитрат, локальну нерівномірність навантаження та зношені ділянки мереж, ще до того, як вони спричинять аварії. Практична користь запропонованого підходу виявляється в переході від реактивного ремонту до прогнозованого сервісного управління. У підсумку громада

отримує більш точне бюджетування, раціональніший розподіл інвестицій і зниження експлуатаційних витрат.

Геоінформаційні системи здатні виконувати не лише візуалізаційну функцію, а й роль аналітичної платформи для стратегічного розвитку територій. За допомогою багатокритеріального ранжування ділянок, оцінки окупності проєктів, моделювання ризиків і різних сценаріїв відновлення формується нова логіка місцевого енергетичного планування. Вона водночас спирається на просторову доцільність, технічну готовність і суспільну потребу. Такий підхід видається особливо важливим для громад, які перебувають у процесі модернізації інфраструктури або післякризового відновлення.

Список використаної літератури

1. Ажаман І. А., Хабіб А., Пущина Н. В., Мельничук О. І. Світовий досвід розвитку системи енергетичного менеджменту та перспективи його впровадження в Україні. *Журнал стратегічних економічних досліджень*. 2023. № 1 (12). С. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5398.2023.1.8>
2. Ачкасов А., Попович Н. В., Пересадько В. А., Гордезіані Т. Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довоєнні реалії й післявоєнні перспективи. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2024. № 60. С. 124–135. DOI: <http://dx.doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09>
3. Громадська спілка «Біоенергетична асоціація України». URL: <https://uabio.org/> (дата звернення: 20.04.2026).
4. Згуровський М. З., Болдак А. О., Бояринова К. О., Дунська А. Р. та ін. Форсайт: виклики енергетичній незалежності країн і регіонів світу на середньостроковому (до 2025 року) і довгостроковому (до 2030 року) часових горизонтах Foresight-Energy-ua-2021. Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку, Інформаційно-аналітичний ситуаційний центр КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. 188 с. URL: http://wdc.org.ua/uk/%20energy_foresight2021
5. Кабінет Міністрів України. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. Київ, 2024. URL: документ PDF (дата звернення: 20.04.2026).
6. Кучер А. В., Синиця О. Економіка й стале управління енергетичними ресурсами в аграрній сфері: монографія. Пловдив: Academic Publishing House «Talent», 2025. 376 с.
7. Суходоля О. М. Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками : монографія. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2023. 136 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-book.2023.01>
8. Buonomano A., Giuzio G. F., Maka R., Russo G., Zizzania S. GIS-driven planning of energy communities: optimising renewables, storage, and demand aggregation in urban areas. *Renewable Energy*. 2026. Vol. 256. Art. 124521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124521>
9. Chowdhury A. K. Smart Renewable Energy Integration for Precision Agriculture in Off-Grid Areas. *Applied Agriculture Sciences*. 2025. Vol. 3. No 1. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.25163/agriculture.3110286>
10. Dedinec A., Dedinec A., Nakev S., Dimitriev D., Mihajloska E., Kocarev L., Zec M., Oakleaf J. R., Kiesecker J. M. Smart Energy Siting to Guide Renewable Energy Transition. *Research Square*. 2025. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7474783/v1>.

11. Karpash M., Zhovtulia L., Soroka N.-A., Maksymiuk S. Development of Municipal Energy Security Plans for Small-sized Municipalities in Ukraine: Challenges, Forecast and Policy Recommendations. *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 654. Art. 05003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565405003>
12. Kochanek A., Generowicz A., Załona T. The Role of Geographic Information Systems in Environmental Management and the Development of Renewable *Energy Sources—A Review Approach*. *Energies*. 2025. Vol. 18. No 17. Art. 4740. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174740>
13. Koçyiğit A., Aksu K., Terzi A. F., Demirel H. Investigating the Role of Geographic Information Systems in Advancing Positive Energy Districts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2026. Vol. XLVIII-4/W18-2025. pp. 221-226. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W18-2025-221-2026>
14. Makedon V., Karpenko L., Petko S., Bondarenko S., Ryzhova V. Economic efficiency and environmental benefits of the development of renewable energy sources. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2024. Vol. 32. No 2. pp. 239-257. URL: <https://novapublishers.com/shop/economic-efficiency-and-environmental-benefits-of-the-development-of-renewable-energy-sources/> (дата звернення: 20.04.2026).
15. Makedon V., Politykin M., Hromyak S., Novosad I., Doronina I. The Role of Renewable Energy in Advancing SDG 7: Ensuring Clean and Affordable *Energy*. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2025. Vol. 8. No 2. pp. 485-505. DOI: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080223>
16. Nassif W. G., Al-Timimi Y. K., Elhmaidi D. GIS-AHP for Optimal Solar Site Selection: A Case Study of Iraq and Its Implications for Climate Change. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2025. Vol. 47. pp. 71-89. DOI: <https://doi.org/10.54337/ijsep.10646>
17. Zaichenko S., Borychenko O., Trachuk A. Geoinformation analysis of the prospects for the development of renewable energy sources in Ukraine, taking into account the remoteness of electricity consumers. *Vidnovliuvana Enerhetyka*. 2025. No 2 (81). pp. 58-66. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).58-66](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).58-66)

References

1. Azhaman, I. A., Khabib, A., Pushchina, N. V., & Melnychuk, O. I. (2023). Svitovyi dosvid rozvytku systemy enerhetychnoho menedzhmentu ta perspektyvy yoho vprovadzhennia v Ukraini [World experience in the development of energy management systems and prospects for its implementation in Ukraine]. *Zhurnal stratehichnykh ekonomichnykh doslidzhen*, 1(12), 73–81. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5398.2023.1.8>
2. Achkasov, A., Popovych, N. V., Peresadko, V. A., & Gordeziani, T. (2024). Heoinformatsiine zabezpechennia heoportaliv terytorialnykh hromad: dovoieni realii y pislivoieni perspektyvy [Geoinformation support of territorial community geoportals: Pre-war realities and post-war prospects]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Serii "Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia"*, 60, 124–135. DOI: <http://dx.doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09>
3. Hromadska spilka "Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy." (n.d.). Available at: <https://uabio.org/>
4. Zghurovskiy, M. Z., Boldak, A. O., Boiarynova, K. O., Dunska, A. R., et al. (2021). Forsait: vyklyky enerhetychnii nezalezhnosti krain i rehioniv svitu na serednostrokovomu (do 2025 roku) i dovrostrokovomu (do 2030 roku) chasovykh

- horyzontakh Foresight-Energy-ua-2021 [Foresight: Challenges to energy independence of countries and regions of the world in the medium-term (to 2025) and long-term (to 2030) horizons]. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 188. Available at: http://wdc.org.ua/uk/%20energy_fore sight2021
5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Natsionalnyi plan z enerhetyky ta klimatu na period do 2030 roku [National energy and climate plan until 2030]. Kyiv. Available at: PDF document.
 6. Kucher, A. V., & Synysia, O. (2025). *Ekonomika y stale upravlinnia enerhetychnymy resursamy v ahrarynii sferi* [Economics and sustainable management of energy resources in the agricultural sector]. Plovdiv: Academic Publishing House Talent, 376.
 7. Sukhodolia, O. M. (2023). *Enerhetychna bezpeka Ukrainy: perspektyvna model upravlinnia ryzykamy* [Energy security of Ukraine: A prospective risk management model]. Kyiv: National Institute for Strategic Studies, 136. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-book.2023.01>
 8. Buonomano, A., Giuzio, G. F., Maka, R., Russo, G., & Zizzania, S. (2026). GIS-driven planning of energy communities: Optimising renewables, storage, and demand aggregation in urban areas. *Renewable Energy*, 256, 124521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124521>
 9. Chowdhury, A. K. (2025). Smart renewable energy integration for precision agriculture in off-grid areas. *Applied Agriculture Sciences*, 3(1), 1–6. DOI: <https://doi.org/10.25163/agriculture.3110286>
 10. Dedinec, A., Dedinec, A., Nakev, S., Dimitriev, D., Mihajloska, E., Kocarev, L., Zec, M., Oakleaf, J. R., & Kiesecker, J. M. (2025). Smart energy siting to guide renewable energy transition. Research Square. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7474783/v1>
 11. Karpash, M., Zhovtulia, L., Soroka, N.-A., & Maksymiuk, S. (2025). Development of municipal energy security plans for small-sized municipalities in Ukraine: Challenges, forecast and policy recommendations. *E3S Web of Conferences*, 654, 05003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565405003>
 12. Kochanek, A., Generowicz, A., & Załona, T. (2025). The role of geographic information systems in environmental management and the development of renewable energy sources—A review approach. *Energies*, 18(17), 4740. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174740>
 13. Koçyiğit, A., Aksu, K., Terzi, A. F., & Demirel, H. (2026). Investigating the role of geographic information systems in advancing positive energy districts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W18-2025, 221–226. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W18-2025-221-2026>
 14. Makedon, V., Karpenko, L., Petko, S., Bondarenko, S., & Ryzhova, V. (2024). Economic efficiency and environmental benefits of the development of renewable energy sources. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 32(2), 239–257. Available at: <https://novapublishers.com/shop/economic-efficiency-and-environmental-benefits-of-the-development-of-renewable-energy-sources/>
 15. Makedon, V., Politykin, M., Hromyak, S., Novosad, I., & Doronina, I. (2025). The role of renewable energy in advancing SDG 7: Ensuring clean and affordable energy. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(2), 485–505. DOI: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080223>
 16. Nassif, W. G., Al-Timimi, Y. K., & Elhmaidi, D. (2025). GIS-AHP for optimal solar site selection: A case study of Iraq and its implications for climate change. *International Journal of Sustainable Energy Plan-*

- ning and Management, 47, 71–89. DOI: <https://doi.org/10.54337/ijsepm.10646>
17. Zaichenko, S., Borychenko, O., & Trachuk, A. (2025). Geoinformation analysis of the prospects for the development of renewable energy sources in Ukraine, taking into account the remoteness of electricity consumers. *Vidnovliuvana Enerhetyka*, 2(81), 58–66. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).58-66](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).58-66)
-

Bihun M., Poliakovska L.

GEOINFORMATION SUPPORT FOR ENERGY RESOURCE PLANNING AND ACCOUNTING IN COMMUNITIES AS A TOOL FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY AND ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 3'26: 183-197.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.03.13>

Abstract. The article defines the methodological foundations of geoinformation support for planning and accounting of energy resources at the level of territorial communities. It proposes integrating spatial datasets, digital registers of municipal infrastructure, operational monitoring systems, and analytical management tools. Particular attention is given to the capabilities of geoinformation platforms during asset inventory, identification of energy losses, and preparation of investment projects. The purpose of the study is to develop an applied model for the use of geoinformation technologies in planning, monitoring, and accounting of energy resources at the community level. Attention is focused on combining data on consumption volumes, the condition of engineering networks, reserves of local generation, and the probability of emergency situations. The research is based on current regulatory acts, official statistics, open geospatial materials, technical characteristics of networks, and registers of municipal utility facilities. The methodological framework includes system analysis, spatial modelling, economic prioritisation of measures, scenario calculations, and comparative assessment of managerial options in the field of energy consumption. The authors substantiate the need to create a unified digital database of energy resources of a territorial community. The article presents tools for visualising areas with excessive consumption, calculating technical losses in networks, and identifying sites for solar, wind, and bioenergy installations. A method for selecting investment projects is proposed, taking into account payback period, technical accessibility, and environmental impact. The effectiveness of combining a geoinformation system with remote-reading meters and a local geoportal is demonstrated. A promising direction for further work is considered to be the development of digital twins of municipal infrastructure. It is also advisable to study the possibilities of artificial intelligence in forecasting energy loads. An important task remains the creation of sectoral standards for spatial data exchange.

Keywords: Geographic Information Systems, energy resources, territorial community, energy efficiency, spatial planning, sustainable development.
