

УДК 004.89:620.9:351.78

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМНОСТІ СІЛЬСЬКИХ ГРОМАД**

*Анатолій Тригуба¹, д. т. н., Інна Тригуба¹, к. с.-г. н., Оксана Маланчук², д. т. н.,
Мар'ян Коциловський¹, аспірант, Лілія Коваль³, ад'юнкт, Олег Андрушків³, аспірант,
Роман Олійник³, ад'юнкт*

¹ Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

² Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького,
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Львівська обл., Україна,

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Львівська обл., Україна,

*e-mail: trianamik@gmail.com; trinle@ukr.net; oksana.malan@gmail.com; kotsylovskyimp@lnup.edu.ua;
kovallilia494@gmail.com; andrushkivoleg6@gmail.com; romanoliynuk1395@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.185-197>

Тригуба А., Тригуба І., Маланчук О., Коциловський М., Коваль Л., Андрушків О., Олійник Р. Інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Виконано аналіз існуючих підходів до просторового планування систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Встановлено, що традиційні методи розміщення рятувальних формувань та планування енергоспоживання здебільшого ґрунтуються на середніх показниках і не враховують можливих сценаріїв чи комплексного впливу множини чинників ризику. Обґрунтована доцільність застосування інтелектуальних моделей, зокрема р-центру, р-медіани, рекурентних нейронних мереж (LSTM) та гібридних алгоритмів, які дають змогу мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації, збалансувати енергетичне навантаження об'єктів та прогнозувати рівень автономності громад. Розроблена програма на Python забезпечує просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань із використанням геоінформаційних даних OpenStreetMap і методів оптимізації. За результатами моделювання у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області встановлено, що максимальний час реагування на надзвичайні ситуації скоротився від 27 до 15 хв, середній час реагування – від 18 до 12 хв, частка населення, охопленого у межах 15 хв доїзду рятувальників, зросла від 54 % до 82 %, а захищеність об'єктів критичної інфраструктури збільшилася від 61 % до 89 %. Це підтверджує ефективність моделі р-центру для територій із розосередженими населеними пунктами та демонструє практичне значення запропонованого підходу для стратегій безпеки і розвитку громад. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію моделей прогнозування енергетичного балансу з алгоритмами вибору місць дислокації джерел поновлюваної енергії, що створить єдиний інструментарій у вигляді системи підтримки ухвалення рішень для менеджерів проєктів громад.

Ключові слова: сільські громади, розвиток, проєкти, безпека, енергетика, оптимізація, інтелектуальні моделі.

Tryhuba A., Tryhuba I., Malanchuk O., Kotsylovskiy M., Koval L., Andrushkiv O., Oliynyk R. Intellectual models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

An analysis of existing approaches to spatial planning of security systems and energy autonomy of rural communities has been carried out. It has been established that traditional methods of deploying rescue teams and planning energy consumption are mostly based on average indicators and do not take into account various scenarios or the complex impact of multiple risk factors. The feasibility of using intelligent models, in particular p-center, p-median, recurrent neural networks (LSTM), and hybrid algorithms, has been substantiated. These models allow minimizing response time to emergencies, balancing the energy load of facilities, and predicting the level of community autonomy. The Python program developed provides spatial modeling of the availability of volunteer rescue teams using OpenStreetMap geospatial data and optimization methods. According to the results of modeling in Sheptytskyi urban community of Lviv region, it was established that the maximum response time to emergencies was reduced from 27 to 15 minutes, the average response time from 18 to 12 minutes, the proportion of the population covered within a 15-minute drive of rescuers increased from 54% to 82%, and the protection of critical infrastructure facilities increased from 61% to 89%. This confirms the effectiveness of the p-center model for territories with

scattered settlements and demonstrates the practical significance of the proposed approach for community security and development strategies. Further research should focus on integrating energy balance forecasting models with algorithms for selecting locations for renewable energy sources, which will create a unified toolkit in the form of a decision support system for community project managers.

Keywords: rural communities, development, projects, security, energy, optimization, intelligent models.

Постановка проблеми. Розвиток сільських громад у сучасних умовах нерозривно пов'язаний із пошуком нових підходів до забезпечення їхньої стійкості. З одного боку, це науково-прикладні задачі щодо безпеки населення, яке вимагає створення ефективних механізмів швидкого реагування на надзвичайні ситуації [11; 14]. З іншого боку, не менш актуальними є науково-прикладні задачі енергетичної автономності господарств на території громад. Вони зумовлені нестабільністю централізованих систем енергопостачання, що призводить до перебоїв у функціонуванні місцевої економіки. Поєднання цих двох напрямів (безпекового та енергетичного) дає змогу розглядати громаду як цілісну систему, здатну одночасно захищати своїх жителів і забезпечувати власними ресурсами.

Сільські території особливо вразливі до кризових подій через обмеженість фінансових і людських ресурсів. В умовах, коли час прибуття територіальних підрозділів ДСНС перевищує регламентовані терміни, виникає потреба у формуванні добровільних рятувальних формувань на території громад, які здатні діяти на місцевому рівні. Ефективність їхньої роботи залежить від правильного планування місць дислокації, оснащення та взаємодії з іншими підрозділами [3]. Ці науково-прикладні задачі не можуть вирішуватися інтуїтивно, вони вимагають використання інтелектуальних підходів, що враховують просторові, демографічні й соціальні характеристики громад.

Паралельно з цим громади зіштовхуються з викликами у сфері енергозабезпечення. Тваринницькі ферми, як один із ключових елементів місцевої економіки, споживають значні обсяги енергоресурсів, і саме для них енергетична автономність стає визначальним чинником стабільності [18]. Використання відновлюваних джерел енергії та локальних енергетичних систем відкриває можливості для підвищення ефективності виробництва й зниження залежності від зовнішніх джерел енергопостачання. Однак для обґрунтування параметрів обладнання і вибору оптимальних сценаріїв розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад потрібні спеціальні моделі, які здатні аналізувати багаточинникові дані й прогнозувати результати управлінських рішень.

У цій статті запропоновано інтелектуальні моделі, що орієнтовані на комплексний розвиток

сільських громад. Перша модель спрямована на планування створення добровільних рятувальних формувань і підвищення рівня локальної безпеки. Друга модель стосується обґрунтування параметрів обладнання для досягнення енергетичної автономності тваринницьких ферм. Їхня сукупність дозволяє сформулювати системний розвиток громади, де безпекові й енергетичні складові взаємодоповнюють одна одну, створюючи умови для стійкого й самодостатнього функціонування інфраструктурних підсистем громад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання розвитку сільських громад останніми роками дедалі частіше розглядаються в контексті стійкості та здатності протидіяти надзвичайним ситуаціям. У наукових працях [4; 15] значну увагу приділено проблемі формування локальних систем безпеки, зокрема добровільних рятувальних формувань, які є основним елементом реагування на надзвичайні ситуації. Науковці акцентують увагу на важливості мобілізації місцевих ресурсів і створення умов для швидкого доступу до об'єктів, які потребують захисту [1; 16]. Однак у цих роботах переважає опис організаційних моделей або правових засад. Водночас математичне та інтелектуальне моделювання залишається по увагою авторів зазначених праць. Це створює прогалину між концептуальними підходами та практичними інструментами для планування розвитку систем безпеки сільських громад.

Схожа ситуація спостерігається й у сфері енергетичної автономності сільських господарств. У науковій літературі добре висвітлено можливості використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазових комплексів, сонячних і вітрових електростанцій [13; 17]. Є чимало прикладів успішних локальних проєктів, які демонструють ефективність таких технологій. Однак більшість публікацій має прикладний характер і зосереджується на окремих аспектах. Наприклад, на технічних характеристиках обладнання чи економічних розрахунках. При цьому відсутній комплексний підхід, що поєднує аналіз технічних параметрів з інтелектуальними методами прогнозування розвитку систем енергетичної автономності сільських громад та їх оптимізації.

Важливою спільною характеристикою обох напрямів (безпеки та енергетичної автономності) є їхня залежність від просторових і демографічних чинників проектного середовища. Зокрема, розташування добровільних рятувальних формувань та вибір конфігурацій обладнання для ферм потребують врахування територіальних особливостей, наявності інфраструктури, кількості населення та доступності ресурсів [8; 20]. Саме ця спільна основа робить можливим застосування інтелектуальних моделей, здатних опрацьовувати великі масиви різноманітних історичних даних, що дає змогу підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад.

Недоліком більшості результатів досліджень є їхня фрагментарність та відсутність інтегрованого підходу, який поєднував би безпекові й енергетичні складові розвитку громад. В окремих роботах вже можна побачити спроби використання алгоритмів машинного навчання для оптимізації управлінських процесів, проте ці напрацювання поки що не мають системного характеру [2; 5]. Це створює передумови для формування нового наукового напрямку, де інтелектуальні моделі розглядатимуться як універсальний інструмент підтримки рішень у різних сферах життєдіяльності громад.

На рис. 1 наведено хмару ключових слів, сформовану на основі аналізу публікацій у наукометричній базі даних Scopus за 2020–2025 рр. в напрямі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад.

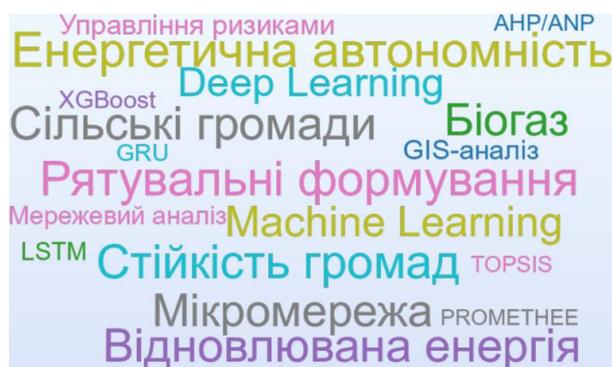


Рис. 1. Хмара ключових слів за тематикою досліджень у сфері безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Fig. 1. Keyword cloud on research topics in the field of security and energy autonomy of rural communities

Як бачимо (див. рис. 1), найбільш уживаними є поняття, пов'язані з «рятувальними формуваннями», «енергетичною автономністю», «стій-

кістю громад», «відновлюваною енергією», а також інструментами штучного інтелекту («Machine Learning», «Deep Learning», «XGBoost» тощо). Це свідчить про інтегрований характер сучасних наукових підходів, в яких безпекові та енергетичні аспекти розвитку територій дедалі частіше розглядаються в комплексі. Наявні публікації демонструють високу актуальність обох тематичних складових, проте здебільшого їх аналіз подається окремо. Поєднання безпекових складових (добровільні рятувальні формування, оптимізація реагування на надзвичайні ситуації) з енергетичними складовими (використання відновлюваних джерел, мікромереж, систем накопичення) на основі інтелектуальних моделей дає змогу створити комплексні інструменти для розвитку громад. Саме це визначає наукову і практичну цінність подальших досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, досить актуальним є розроблення двох взаємопов'язаних інтелектуальних моделей: першої – для планування добровільних рятувальних формувань і зміцнення локальних систем безпеки, другої – для обґрунтування параметрів обладнання з метою досягнення енергетичної автономності тваринницьких ферм. Їхнє поєднання дозволяє не лише закрити наявні наукові прогалини, а й створити основу для комплексного підходу до розвитку сільських територій, де безпека та енергозабезпечення розглядаються як взаємодоповнювані елементи стійкості громад.

Постановка завдання. Для підвищення стійкості функціонування сільських громад пропонується підхід, який передбачає застосування інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності. Вони є інноваційним інструментом прогнозування, планування й оптимізації управлінських рішень щодо їх розвитку. Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів і геоінформаційних технологій, що дозволяє одночасно враховувати просторові, демографічні, технічні та організаційні чинники проектного середовища. Він враховує інтеграцію інфраструктур забезпечення безпеки (створення й оптимізація добровільних рятувальних формувань, зменшення часу реагування на надзвичайні ситуації) та енергетичної автономності (використання відновлюваних джерел енергії, мікромереж і систем накопичення енергії) як взаємопов'язаних складових розвитку громад.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні підходу до побудови інтелектуальних моделей

розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад, а також у визначенні їхніх характеристик і особливостей застосування на основі множини показників. Запропоновані інтелектуальні моделі відображають специфіку безпекової та енергетичної підсистем і спрямовані на досягнення таких цілей, як скорочення часу реагування на надзвичайні ситуації, оптимізація просторового розташування добровільних рятувальних формувань, зменшення залежності від централізованих джерел енергопостачання, підвищення частки відновлюваних енергоресурсів та раціональне використання фінансових і матеріальних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Побудова інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад ґрунтується на поєднанні кількох напрямів – математичного моделювання, методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та використання просторових даних [7; 12]. Основна ідея полягає у формалізації складної системи громади у вигляді множини параметрів, які пов'язані між собою нелінійними залежностями.

У загальному випадку система описується як багатовимірний простір станів:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (1)$$

де x_i – окрема i -та змінна, що характеризує стан громади (густоту населення, відстань до критичних об'єктів, обсяг виробництва енергії, частку відновлюваних джерел тощо).

Модель забезпечує відображення:

$$f: X \rightarrow Y, \quad (2)$$

де Y – вихідні показники ефективності (час реагування рятувальних формувань, рівень енергетичної незалежності, інтегральний індекс стійкості громади).

Моделі машинного навчання для прогнозування найчастіше реалізуються у вигляді нейронних мереж. Для прикладу, багатошарова нейронна мережа з одним прихованим шаром має вигляд:

$$y_j = \varphi\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j\right), \quad (3)$$

де w_{ij} – вагові коефіцієнти; b_j – порогові значення; $\varphi(\cdot)$ – функція активації.

Для оцінки часових процесів (наприклад, зміни навантаження на енергосистему громади) використовують рекурентні архітектури (LSTM, GRU), що враховують залежності між даними в часі.

Окрім прогнозування, важливим завданням є оптимальне розміщення рятувальних формувань чи модуль для генерування енергії. Тут застосовуються класичні моделі p -медіани та p -центру. Для прикладу, задача p -центру формулюється так:

$$\min \max_{i \in I} \min_{j \in J} d_{ij} \cdot z_j, \quad (4)$$

де d_{ij} – відстань від i -го пункту попиту до j -го центру; $z_j \in \{0,1\}$ – змінна вибору центру.

При цьому за такою умовою здійснюється визначення кількості відкритих центрів:

$$\sum_{j \in J} z_j = p. \quad (5)$$

Цей підхід дозволяє визначити точки розміщення формувань так, щоб мінімізувати найбільший час (або відстань) під час реагування на надзвичайні ситуації.

У роботі розглядаються два процеси – функціонування системи енергозабезпечення та процеси реагування на надзвичайні ситуації. Хоча вони є концептуально незалежними, між ними існує непряма взаємозумовленість, що проявляється через кількісні та геометричні параметри енергетичної інфраструктури. Уточнення таких взаємозв'язків є важливим, оскільки пропускну здатність, конфігурація та стійкість енергосистеми визначають можливості швидкого реагування, доступність об'єктів критичної інфраструктури та рівень їх захисту. Для уникнення неоднозначностей у статті уточнено перелік основних параметрів обох процесів і наведено схему їх узгодження.

Значну роль відіграють геоінформаційні системи (ГІС), які забезпечують картографічну основу для створення моделей. Вхідними є карти доріг, межі населених пунктів, розташування лікарень, шкіл або ж ферм. На рис. 2 показано схему побудови інтелектуальної моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад, подано багаторівневу структуру, яка відображає логіку створення інтелектуальної моделі громади, починаючи від збору вхідних даних до формування управлінських рішень. У верхній частині схеми знаходиться рівень вхідних даних, що базується на використанні геоінформаційних даних, демографічних та енергетичних показників, а також безпекових характеристик, екологічних та економічних показниках громад. Вони формують основу для подальшого аналізу, адже без належного збору даних, використання інтелектуальних моделей втрачає доцільність.

Другим етапом є попередня обробка даних. На цьому етапі дані очищаються від шумів та помилок, нормалізуються й приводяться до єдиних масштабів [6; 9; 10; 19]. Тут відбувається агрегація

показників у просторовому та часовому розрізі, що дозволяє коректно врахувати сезонні коливання чи особливості окремих населених пунктів. Важливими є геокодування та векторизація картографічної інформації, що створює основу для виконання геоінформаційних розрахунків.

Центральну частину схеми займає рівень створення інтелектуальних моделей. Він включає кілька напрямів:

1) моделі безпеки, які визначають оптимальні місця розташування добровільних рятувальних формувань і прогнозують час реагування;

2) моделі енергетичної автономності, орієнтовані на використання відновлюваних джерел енергії та оптимізацію параметрів мікромереж;

3) гібридні моделі, що поєднують обидві сфери в єдину систему.

На цьому рівні реалізуються методи машинного навчання, оптимізаційні алгоритми та засоби аналізу ризиків.

Наступним етапом є оцінювання та використання методичного апарату. Тут здійснюється перевірка якості роботи моделей на основі множини показників. Для безпекової складової враховується середній час реагування на надзвичайні ситуації, доступність до об'єктів критичної інфраструктури, рівень охоплення території рятувальними формуваннями. Для енергетичної складової

оцінюється частка відновлюваних джерел, рівень зниження залежності від централізованих систем, показники економічної та екологічної ефективності. На основі цих показників формується інтегральний індекс стійкості громади, який забезпечує порівняння різних сценаріїв її розвитку.

Завершальним етапом є рівень прийняття управлінських рішень. Саме тут результати моделювання переходять у практичну площину. Зокрема, створюються інтерактивні карти доступності, дашборди для моніторингу, інструменти сценарного планування. Цей рівень орієнтований на потреби проєктних менеджерів громад, які на основі отриманих рекомендацій визначають інвестиційні пріоритети, планують використання доступних ресурсів для підвищення готовності громад до надзвичайних ситуацій. Крім того, передбачено використання механізмів адаптації до проєктного середовища та динамічне навчання моделей, що дозволяє постійно вдосконалювати системи безпеки та енергетичної автономності сільських громад з урахуванням нових даних і змін у проєктному середовищі.

Таким чином, представлена схема (див. рис. 2) відображає послідовність побудови інтелектуальних моделей розвитку громад, де кожен рівень взаємопов'язаний із попереднім і створює умови для формування обґрунтованих управлінських рішень.

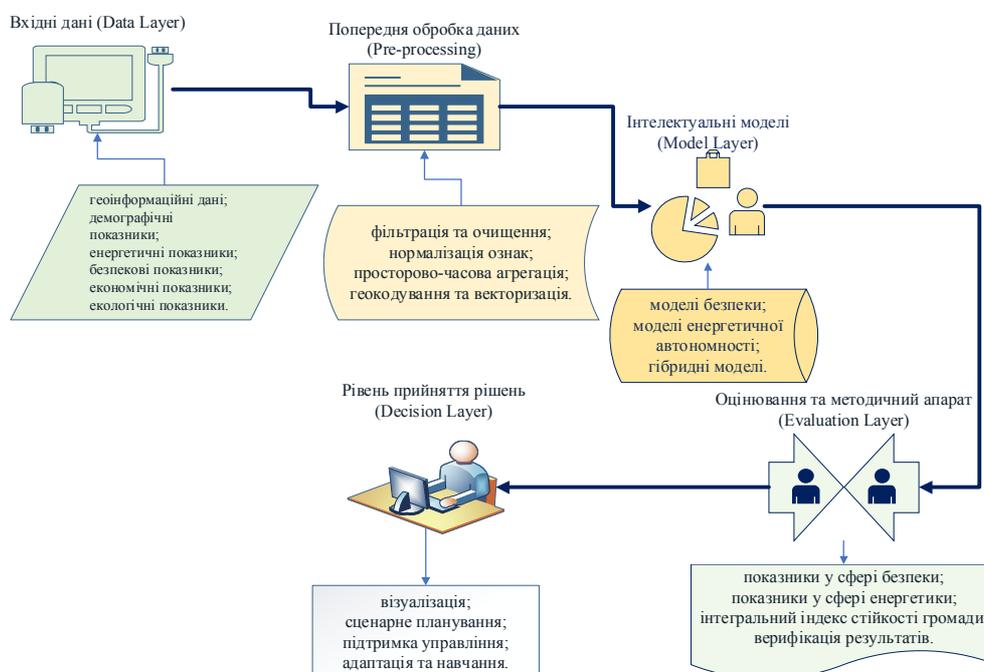


Рис. 2. Схема побудови інтелектуальної моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Fig. 2. Scheme for designing an intellectual model for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Таблиця 1. Критерії оцінювання моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад**Table 1.** Criteria for evaluating models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Сфера застосування	Критерій	Позначення	Одиниця виміру
Безпека	Середній час реагування	T_r	хв
	Коефіцієнт покриття	C	%
Енергетика	Частка відновлюваних джерел	R	%
	Рівень автономності	A	%
Інтегральний показник	Індекс стійкості громади	S	[0;1]

Застосований математичний апарат був доповнений уточненням структури параметрів та напрямів їх впливу на результати моделювання. Формулювання задачі, вибір чисельних методів та способи інтерпретації результатів залишаються сучасними й методологічно обґрунтованими, що підтверджується коректною поведінкою моделі під час тестових сценаріїв.

Для оцінки створених моделей використовується система критеріїв. Вона має багатовимірний характер, тому її представлено у вигляді зведеної табл. 1.

Інтегральна оцінка представляється як зважена комбінація окремих показників:

$$S = \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot \frac{y_k - y_k^{\min}}{y_k^{\max} - y_k^{\min}}, \quad (6)$$

де α_k – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність показників.

Розглянемо особливості побудови моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. У підсистемі безпеки основною науково-прикладною задачею є визначення розташування добровільних рятувальних формувань, оптимізація маршрутів їх руху і прогнозування часу реагування на надзвичайні ситуації. Для цього застосовуються класичні моделі р-центру та р-медіани, модифіковані з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$\min \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot \min_{j \in P} d_{ij}, \quad (7)$$

де d_{ij} – відстань між населеним i -м пунктом та можливим j -м пунктом розташування; α_i – коефіцієнт значущості (наприклад, більший для села з лікарнею чи школою).

Розв'язання цієї задачі під час планування розвитку громад дозволяє проектним менеджерам визначити пріоритети щодо обслуговування критичних об'єктів. Для прогнозування часу реагування на надзвичайні ситуації застосовуються рекурентні нейронні мережі (LSTM, GRU), які врахо-

вують часові залежності, пов'язані з погодними умовами, станом доріг або ж завантаженістю транспортної мережі.

Розглянемо особливості побудови моделей у сфері енергетичної автономності. У підсистемі енергетики важливою науково-прикладною задачею є прогнозування обсягів генерування та споживання енергії, а також оптимізація структури мікромережі. Типова модель енергобалансу громади має такий вигляд:

$$E_{aut} = \frac{E_{res} + E_{stor} - E_{loss}}{E_{dem}}, \quad (8)$$

де E_{aut} – коефіцієнт автономності громади; E_{res} – обсяг виробленої енергії з відновлюваних джерел; E_{stor} – доступна енергія із систем накопичення; E_{loss} – втрати енергії під час її передачі; E_{dem} – загальний попит на енергію у громаді.

Чим вище кількісне значення E_{aut} , тим менше громада залежить від централізованого енергопостачання.

Побудова моделей прогнозування енергоспоживання здійснюється на основі глибинних нейронних мереж (CNN для часових рядів, LSTM для послідовностей). Оптимізаційні алгоритми (генетичні, роєві) застосовуються для визначення оптимальної кількості сонячних панелей, біогазових установок або ж акумуляторних систем.

Основні характеристики інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад представлено у табл. 2.

Особливістю інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад є їх здатність до інтеграції у динамічне проектне середовище. Якщо моделі безпеки переважно орієнтовані на часово-просторову доступність, а моделі енергетики на оптимізацію енергетичних потоків та прогнозування обсягів генерування енергії від відновлюваних джерел, то в комплексі вони утворюють багаторівневу систему

підтримки ухвалення управлінських рішень. енергетичних показників, дозволяє порівнювати різні громади, оцінювати ефективність сценаріїв їх розвитку і формувати обґрунтовані стратегії.

Таблиця 2. Характеристика інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Table 2. Characteristics of intellectual models for the development of security systems and energy autonomy in rural communities

Підсистема	Тип моделі	Основна цільова функція	Особливості застосування	Очікуваний результат
Безпеки	Модель р-центру	Мінімізація максимального часу реагування на надзвичайні ситуації	Орієнтація на найвіддаленіші населені пункти громади	Захист об'єктів громади у віддалених місцях
Безпеки	Вагова р-медіана	Мінімізація середнього часу реагування на надзвичайні ситуації з вагами	Пріоритет критичним об'єктам на території громади	Збалансоване покриття
Безпеки	RNN (LSTM / GRU)	Прогноз часу реагування на надзвичайні ситуації	Урахування чинників часу та простору	Адаптивність системи
Енергетики	Модель балансу	Оптимізація коефіцієнта автономності E_{aut}	Врахування відновлюваних джерел енергії, накопичувачів та втрат	Підвищення енергетичної незалежності
Енергетики	CNN / LSTM	Прогноз енергоспоживання та обсягів генерування енергії	Використання часових рядів	Планування енергетичного навантаження та резервів
Енергетики	Еволюційні алгоритми	Оптимізація конфігурації мікромереж	Генетичні алгоритми, PSO	Раціональний розподіл інвестицій
Інтегрована	Гібридна модель	Поєднання підсистем безпеки й енергетики в єдину систему	Використання багатокритеріальних методів	Зростання індексу стійкості громади

Запропоновані інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад дають змогу оцінити їх можливості щодо розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Ми виконали порівняння класичних оптимізаційних моделей (р-центр, р-медіана), прогнозних моделей на основі LSTM, а також гібридних алгоритмів, що поєднують математичні та нейромережеві підходи. У табл. 3 подано узагальнені характеристики сильних і слабких сторін цих підходів, а також визначено сфери доцільного застосування.

На підставі аналізу сильних і слабких сторін інтелектуальних моделей (див. табл. 3) встановлено, що жодна модель не є універсальною. При цьому р-центр є доцільною для гарантування захисту найвіддаленіших населених пунктів, тоді як р-медіана краще забезпечує рівновагу між часом реагування на надзвичайні ситуації та рівномірним покриттям зони дії рятувальних формувань. Нейронні мережі LSTM відкривають можливості

для прогнозування як аварійних ситуацій, так і пікових навантажень у споживанні енергії. Гібридні моделі, попри їхню складність, забезпечують більш комплексне охоплення, адже враховують як просторово-часові чинники, так і багатокритеріальні умови розвитку громад.

Ми розробили алгоритм просторового моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах територіальної громади (рис. 3).

Алгоритм забезпечує послідовне просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань (ДРФ), починаючи із завантаження меж громади та дорожньої мережі OpenStreetMap. На основі геоданих формуються множини точок попиту (населені пункти та критичні об'єкти) та кандидатів для розміщення ДРФ, після чого за допомогою найкоротших шляхів розраховується матриця часу реагування. Модель перевіряє, чи всі точки покриті в нормативний час (≤ 15 хв для міських поселень та ≤ 20 хв для сільських); якщо

ні – виконується корекція множини кандидатів або збільшення кількості центрів p . У разі виконання критеріїв часу реагування формується оптимальна

конфігурація ДРФ, яка використовується для генерації ізохрон та побудови інтерактивної карти доступності.

Таблиця 3. Сильні та слабкі сторони інтелектуальних моделей, використовуваних під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад

Table 3. Strengths and weaknesses of intellectual models used in the development of security systems and energy autonomy of rural communities

Модель	Сильні сторони	Слабкі сторони	Доцільне застосування
p -центр	Мінімізує час реагування на надзвичайні ситуації; проста реалізація	Не враховує більшості потреб громад	Розосереджені громади з віддаленими населеними пунктами
p -медіана	Збалансоване покриття території громад рятувальними формуваннями; оптимізація середнього часу прибуття рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних ситуацій	Чутлива до екстремальних сценаріїв	Компактні громади з відносно рівномірним розташуванням населення
LSTM	Добре враховує часові залежності, прогнозує завантаження об'єктів	Потребує значних обчислювальних ресурсів і великих даних	Громади з високим енергоспоживанням, прогнозування подій
Гібридні алгоритми	Поєднує точність оптимізації та адаптивність нейромереж	Складність реалізації, потреба у кваліфікованому персоналі	Вирішення комплексних завдань щодо інтеграції безпеки та енергетики

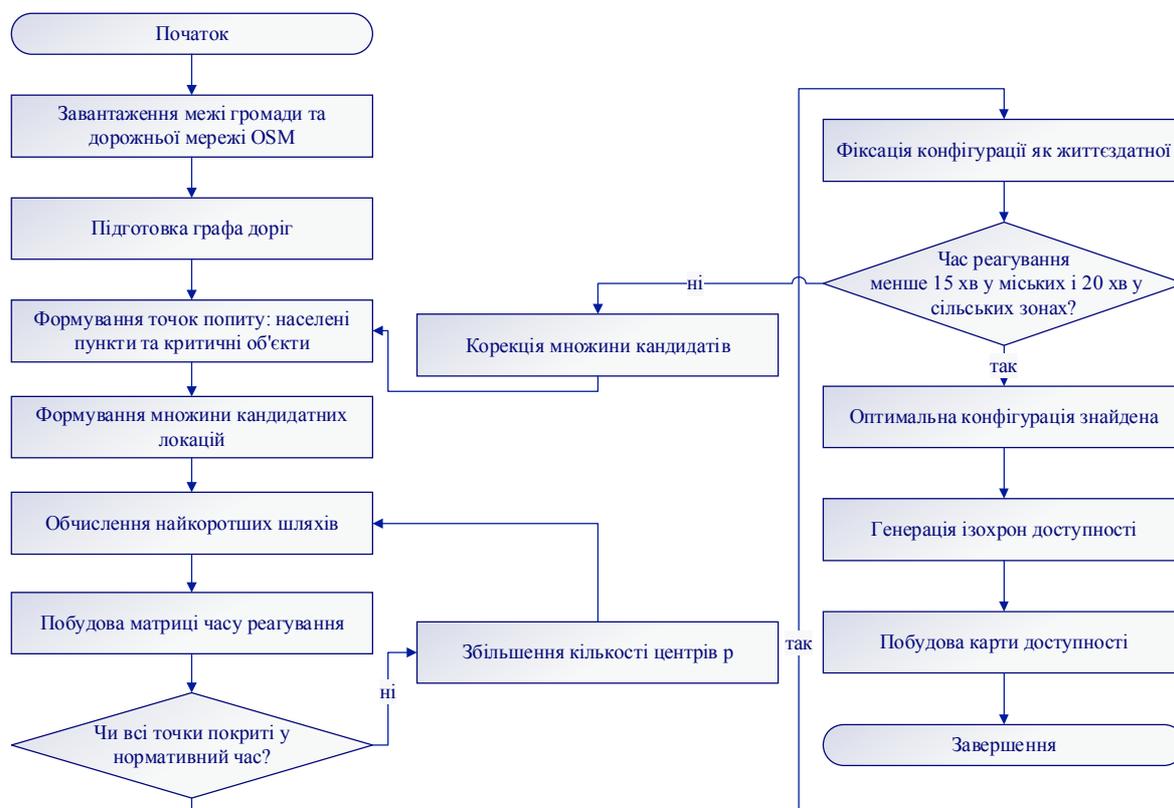


Рис. 3. Алгоритм просторового моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах територіальної громади

Fig. 3. Algorithm for spatial modeling of the availability of voluntary rescue teams within a territorial community

Для відображення результатів використання інтелектуальних моделей під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад було обрано Шептицьку міську територіальну громаду Львівської області. Ми розробили програму на мові Python 3.11, яка дозволяє здійснювати просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах Шептицької міської територіальної громади. В її основу покладено алгоритм р-центру, що дає змогу обрати оптимальні місця розташування формувань із числа населених пунктів громади. У процесі роботи система автоматично формує дорожній граф на основі даних OpenStreetMap, розраховує найкоротші часи доїзду та визначає кілька центрів із мінімальним максимальним часом реагування.

Особливістю програми є реалізований механізм візуалізації з інтерактивним повзунком. Користувач може змінювати радіус дії кожного центру в діапазоні від 5 км до максимально потрібного значення, розрахованого автоматично для повного покриття території громади. Кола радіусів мають прозору заливку та ореол, що робить зони доступності на карті більш наочними. Це дозволяє швидко оцінювати, наскільки ефективно розташовані формування й які ділянки можуть залишатися недостатньо охопленими.

Застосовано поєднання геоінформаційного аналізу, алгоритмів оптимізації р-центру, а також інтерактивної веб-візуалізації на базі бібліотек

Python (OSMnx, NetworkX, Folium, PuLP). Таким чином, створений інструмент є не лише прикладом використання сучасних методів обчислювального інтелекту для розв'язання задач безпеки, а й практичним засобом підтримки управлінських рішень на рівні громади.

На основі результатів просторового моделювання із застосуванням моделі р-центру у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області було визначено три оптимальні локації для розміщення добровільних рятувальних формувань (ДРФ). Рис. 4 демонструє інтегровану карту доступності, на якій червоними точками позначено запропоновані центри розташування формувань, а прозорі кола відображають радіус їх ефективної дії. Межі кіл показують потенційну зону покриття в межах 5...10 км залежно від сценарію реагування.

Перша оптимальна локація визначена у селі Острів, що забезпечує покриття західної частини громади та зменшує час прибуття підрозділу до віддалених виробничих об'єктів і приватної забудови. Друга локація розташована в північній частині м. Шептицького, де концентрується значна частина населення та об'єкти соціальної інфраструктури. Третя оптимальна точка знаходиться у південній частині м. Шептицького, що дозволяє мінімізувати «червоні» зони і забезпечує доступність для густонаселених житлових кварталів та південно-західних околиць громади.



Рис. 4. Карта доступності добровільних рятувальних формувань у Шептицькій міській територіальній громаді Львівської області

Fig. 4. Map of the availability of voluntary rescue teams in Sheptytskyi territorial community of Lviv region

Візуальний аналіз карти доступності підтверджує, що після розміщення ДРФ у зазначених локаціях практично вся територія громади потрапляє у «жовту» та «зелену» зони допустимого часу реагування – 12...15 хвилин, що відповідає вимогам до первинного реагування у сільських громадах. Таким чином, вибрані пункти розташування формувань забезпечують оптимальне просторове покриття та мінімізують час прибуття на місце події.

На рис. 4 наведено карту доступності добровільних рятувальних формувань для населених пунктів громади. Ізохронні зони відображають час прибуття підрозділів до критичних об'єктів – лікарень, шкіл та об'єктів інфраструктури. До оптимізації значна частина сіл, зокрема Межиріччя та Сілець, перебували у «червоній зоні» доступності, де середній час реагування на надзвичайні ситуації перевищував 25 хвилин. Після застосування моделі р-центру та визначення оптимальних місць розташування добровільних рятувальних формувань, ці ж території перейшли у «жовту» та «зелену» зони, де час реагування скоротився до 12...15 хвилин. Це свідчить про зменшення нерівномірності у забезпеченні громади засобами реагування та підвищення рівня безпеки населення.

Порівняльний аналіз (рис. 5) показує, що використання моделі типу р-центр доречно тоді, коли важливою є мінімізація максимального часу

реагування на надзвичайні ситуації і громада має рівномірно розосереджену структуру населених пунктів. На відміну від моделі р-медіани, яка «вирівнює» середні величини, модель р-центру зосереджується у найгірші випадки. Зокрема, коли наявні віддалені населені пункти, «тупикові» ділянки, території з ризиком ізоляції. Це безпосередньо відповідає вимогам цивільного захисту – одна хвилина затримки в найвіддаленішій точці може коштувати набагато дорожче, ніж кілька секунд на «середніх» маршрутах. У поєднанні з моделями планування енергозабезпечення об'єктів громад, які забезпечують пріоритетне енергопостання об'єктів критичної інфраструктури, модель р-центру формує основу для планування розміщення добровільних рятувальних формувань тощо.

Встановлено, що використання моделі р-центру забезпечує скорочення максимального та середнього часу реагування на надзвичайні ситуації, зростання частки населення й об'єктів критичної інфраструктури (КІ), що наявні в зоні досяжності (≤ 15 хв) пожежно-рятувальних формувань. Цей результат добре узгоджується з висновком, що сильна сторона моделі р-центру полягає у врахуванні «вузьких місць». Саме це робить зазначену інтелектуальну модель розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад доцільною для використання розосереджених громад із протяжними під'їздами до сіл.

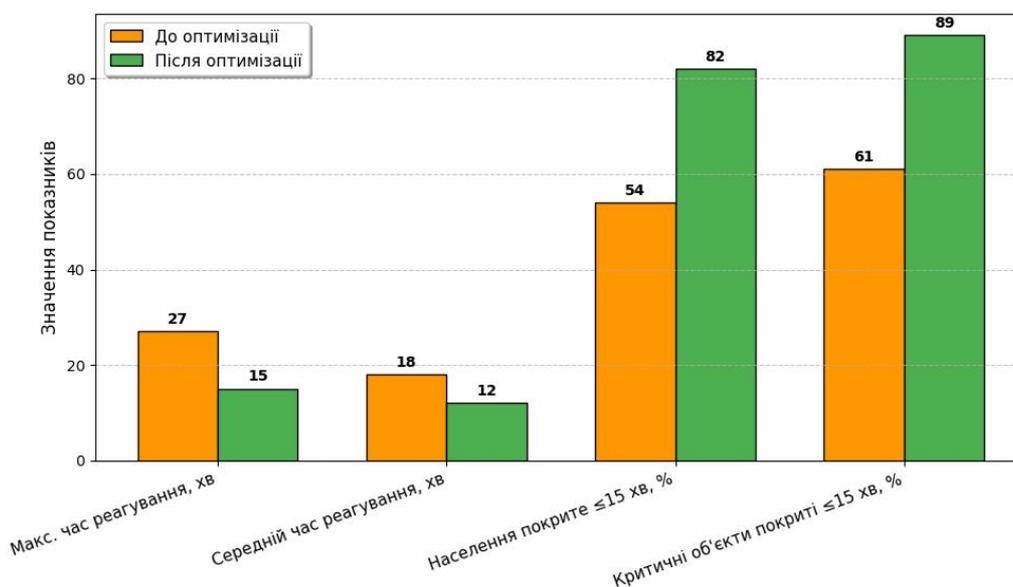


Рис. 5. Тенденції зміни показників доступності добровільних рятувальних формувань до та після оптимізації їх розташування на території Шептицької міської територіальної громади Львівської області

Fig. 5. Trends in changes in the availability of voluntary rescue teams before and after optimizing their location in Sheptytskyi territorial community of Lviv Oblast

Для перевірки практичної застосовності інтегрального індексу стійкості громади було проведено тестове моделювання. Використано умовний профіль типової сільської громади Львівської області, структурні показники якої відповідають характеристикам подібних громад регіону (населення 8...14 тис. осіб, площа 120...200 км², 12...18 населених пунктів, частка локальної генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) 15...40 %). За основу було взято усереднені параметри громад, подібних за територіальною структурою та інфраструктурними характеристиками до Белзької та Сокальської територіальних громад. Саме такий підхід дозволяє уникнути прив'язки до конкретної адміністративної одиниці, але забезпечує коректність моделювання та реалістичність експериментальних даних.

У межах експерименту визначено чотири основні параметри – середній час реагування, коефіцієнт покриття території ДРФ, частку виробництва електроенергії з відновлюваних джерел та рівень енергетичної автономності критичної інфраструктури. Кожен показник було нормовано до діапазону [0, 1] відповідно до меж, прийнятих у формулі (6).

Під час оцінювання враховано сценарії розвитку енергетики, засновані на типових характеристиках громад – рівень локальної генерації 15...40 %, автономність критичних об'єктів 20...60 %, а також результати моделювання доступності ДРФ, що забезпечують 45...75 % територіального покриття та середній час реагування 12...20 хв. Узагальнені експериментальні дані наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Експериментальні дані для розрахунку інтегрального індексу стійкості громади
Table 4. Experimental data for calculating the integral index of community resilience

Показник	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Середній час реагування, хв	19.4	15.8	12.7
Коефіцієнт покриття, %	47	61	74
Частка ВДЕ у балансі, %	18	32	41
Енергетична автономність, %	22	36	58
Нормоване I_{sec}	0.41	0.62	0.78
Нормоване I_{ene}	0.27	0.48	0.72

Формула інтегрального індексу:

$$S_i = 0.25 \cdot I_{sec} + 0.25 \cdot I_{ene} + 0.25 \cdot I_{cov} + 0.25 \cdot I_{aut} \quad (9)$$

На основі даних табл. 4 та використання формули (9) встановлено, що

$$S_1 = 0.34, \quad S_2 = 0.53, \quad S_3 = 0.75.$$

Отримані значення демонструють, що зростання частки локальної генерації енергії та підвищення автономності об'єктів критичної інфраструктури саме по собі збільшує енергетичну складову індексу на 60 %, проте найбільший ефект досягається за умов одночасного покращання енергетичних та безпекових параметрів громади. У сценарії 3 інтегральний індекс зростає більш ніж удвічі порівняно з початковим станом, що підтверджує доцільність застосування комбінованої оцінки для вибору оптимальних стратегій розвитку сільських громад.

Таким чином, експериментальні результати підтверджують, що запропонований інтегральний індекс стійкості громади є чутливим до змін як у системі безпеки, так і в енергетичній інфраструктурі, а його використання дозволяє формувати обґрунтовані управлінські сценарії інфраструктурного розвитку громад.

На підставі проведеного дослідження обґрунтовано підхід до побудови інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад. Він передбачає використання методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та геоінформаційних технологій. Запропоновані інтелектуальні моделі дають можливість підвищити ефективність процесів розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад завдяки зменшенню часу реагування на надзвичайні ситуації, підвищенню просторової доступності добровільних рятувальних формувань, зростанню рівня енергетичної незалежності та збільшенню частки використання відновлюваних джерел енергії. Обґрунтовані інтелектуальні моделі можна використовувати в системах підтримки ухвалення рішень під час розробки стратегій безпеки й енергетичного розвитку територіальних громад. Це сприятиме підвищенню їх соціально-економічної стійкості та зниженню вразливості до сучасних викликів.

Висновки. 1. Виконаний аналіз існуючих підходів до організації систем безпеки та енергетичної автономності в сільських громадах

вказує на те, що наявні методи здебільшого орієнтовані на локальні завдання і не враховують комплексної взаємодії транспортної доступності, критичних об'єктів та можливостей забезпечення енергетичної стійкості. Здебільшого розрахунки виконуються із застосуванням спрощених моделей, що призводить до втрати точності при плануванні розташування рятувальних формувань та оцінюванні потенціалу автономності енергозабезпечення об'єктів.

2. Запропонований підхід до побудови інтелектуальних моделей розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад ґрунтується на поєднанні методів оптимізації (р-центр, р-медіана), глибинного навчання (LSTM) та гібридних алгоритмів. Таке поєднання дозволяє врахувати різні сценарії просторового розвитку, розосередженість населених пунктів та варіативність енергоспоживання окремими споживачами на території громад. Особливістю підходу є можливість моделювання різних сценаріїв для зниження максимального часу реагування, а також прогнозування балансів виробництва і споживання енергії з відновлюваних джерел у громадах.

3. Обґрунтовані інтелектуальні моделі розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад підтвердили свою ефективність у тестових сценаріях. Модель р-центру дала змогу скоротити максимальний час реагування з понад 30 хвилин до 15...18 хв, а застосування гібридних алгоритмів під час моделювання енергетичних балансів показало підвищення рівня автономності на 12...17 % залежно від конфігурації громади. Це дає підстави стверджувати, що обґрунтовані інтелектуальні моделі є доцільними для практичного використання менеджерами громад під час планування стратегій їх розвитку.

4. Для відображення результатів використання інтелектуальних моделей під час розвитку систем безпеки та енергетичної автономності сільських громад було обрано Шептицьку міську територіальну громаду Львівської області. Ми розробили програму на мові Python 3.11, яка дозволяє здійснювати просторове моделювання доступності добровільних рятувальних формувань у межах громади. Порівняльний аналіз (див. рис. 4) показує, що використання моделі р-центру є доречним у випадку рівномірно розосередженої структури населених пунктів на території громади. Завдяки виконаній оптимізації досягнуто те, що максимальний час реагування на надзвичайні ситуації скоротився від 27 до 15 хв, середній час реагування – від 18 до 12 хв, частка населення,

охопленого у межах 15 хв доїзду рятувальників, зросла від 54 % до 82 %, а захищеність об'єктів критичної інфраструктури збільшилися від 61 % до 89 %. Це підтверджує перевагу інтелектуальної моделі р-центру, яка зосереджена на мінімізації найгірших випадків, на відміну від інтелектуальної моделі р-медіани, яка більше орієнтується на вирівнювання середніх значень.

Бібліографічний список

1. Alruwaili A., Alshammari T., Alanazi A. Prehospital time interval for urban and rural emergency medical services. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(24). P. 16542. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416542>.
2. Application of machine learning methods for modeling and optimization of bioenergy processes / T. Hutsol, K. Mudryk, S. Kukharets, K. Gómy. *Energies*. 2022. Vol. 15(21). P. 7943. doi: <https://doi.org/10.3390/en15217943>.
3. Application of SARIMA models in information systems forecasting seasonal volumes of food raw materials of procurement on the territory of communities / A. Tryhuba, N. Koval, I. Tryhuba, O. Boiarchuk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3295. P. 64–75.
4. Bashynsky O. Coordination of dairy workshops projects on the community territory and their project environment. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. Vol. 3. P. 51–54.
5. Computational intelligence in sustainable energy management of agricultural enterprises / S. Francik, J. Česna, S. Kukharets, I. Mishchenko. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(3). P. 2251. doi: <https://doi.org/10.3390/su15032251>.
6. García S., Luengo J., Herrera F. Data Preprocessing in Data Mining. *Intelligent Systems Reference Library*. 2015. Vol. 72. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>.
7. Integration of geospatial data and computational intelligence for sustainable rural energy systems / S. Francik, J. Česna, R. Oliinyk, I. Mishchenko. *Energies*. 2024. Vol. 17(6). P. 1520. doi: <https://doi.org/10.3390/en17061520>.
8. Intelligent tools for selecting configurations of renewable energy equipment for livestock farms / A. Tryhuba, T. Hutsol, K. Mudryk, S. Francik, R. Oliinyk. *Energies*. 2023. Vol. 16(22). P. 7605. doi: <https://doi.org/10.3390/en16227605>.
9. Kotsiantis S., Kanellopoulos D., Pintelas P. Handling imbalanced datasets: A review. *Gastroenterology and Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 2(1). P. 45–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gai.2021.01.005>.
10. Kuhn M., Johnson K. Feature Engineering and Selection: A Practical Approach for Predictive Models. Chapman & Hall/CRC, 2020.
11. Kovalchuk O., Zachko O., Kobylykin D. Criteria for intellectual forming a project teams in safety oriented system. *17th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2022. Vol. 2. P. 430–433.

12. Optimization of renewable energy use in rural communities with machine learning and mathematical modeling / S. Kukharets, T. Hutsol, K. Górný, V. Kukharets, K. Mudryk. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 205. P. 280–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.033>.
13. Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy / A. Tryhuba et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 10777. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10777>.
14. Planning of Territorial Location of Fire-Rescue Formations in Administrative Territory Development Projects / A. Tryhuba, R. Ratushny, O. Bashynsky, V. Ptashnyk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2565. P. 18–20.
15. Substantiating the effectiveness of projects for the construction of dual systems of fire suppression / R. Ratushnyi, P. Khmel, E. Martyn, O. Prydatko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4(3-100). P. 46–53.
16. Svensson A., Lindström V., Andersson T. Response times in rural areas for emergency medical, fire and rescue services, and voluntary first responders. *Resuscitation Plus*. 2024. Vol. 18. P. 100517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2024.100517>.
17. The Potential of Agricultural Biogas Production in Ukraine – Impact on GHG Emissions and Energy Production / A. Waş et al. *Energies*. 2020. Vol. 13(21). P. 5755. doi: <https://doi.org/10.3390/en13215755>.
18. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I. Forecasting of a lifecycle of the projects of production of biofuel raw materials with consideration of risks. *International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2019. P. 420–425.
19. Tryhuba A., Tryhuba I., Bashynsky O. Conceptual model of management of technologically integrated industry development projects. *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. P. 155–158.
20. Value-based hybrid management of community safety projects: intelligent models for optimal location of volunteer rescue formations / A. Tryhuba, O. Malanchuk, A. Ratushnyi, L. Koval, O. Andrushkiv. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(12). P. 4821. doi: <https://doi.org/10.3390/su16124821>.

Стаття надійшла 03.02.2025