

UDC 620.9:504

Roman Hamotskyi, PhD student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> **e-mail:** roman.hamotskyi@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

INTEGRATION OF ENVIRONMENTAL SAFETY INTO MECHANISMS FOR COMBATING ENERGY THREATS TO RESIDENTIAL BUILDINGS

***Abstract.** This article explores the integration of environmental safety into mechanisms for countering energy threats to residential buildings, a matter of heightened relevance in the context of full-scale warfare. Widespread attacks on critical infrastructure have led to disruptions in energy supply, increased reliance on emergency power sources, intensified environmental pollution, and the accumulation of hazardous waste, including radiological risks. Under such conditions, ensuring energy stability must be accompanied by ecological responsibility and adherence to the principles of sustainable development. Contemporary approaches to energy efficiency are analysed, with emphasis on those that incorporate environmental consequences and contribute to the resilience of residential infrastructure. Strategic planning is foregrounded, encompassing environmental monitoring, damage assessment, scenario modelling for resilience, and social auditing. The application of the Integrated Environmental Assessment (IEA) methodology is substantiated as a key instrument for developing ecologically balanced response strategies to energy threats in the housing sector. IEA enables the synthesis of multidimensional data on the condition of energy infrastructure, environmental risks, and social impacts, facilitating systemic evaluation under crisis scenarios. The importance of energy supply monitoring is highlighted as a dynamic indicator of building resilience, allowing for the timely identification of critical zones and forecasting of supply disruptions. Infrastructure damage analysis is conducted with consideration of building typologies, materials, degrees of deterioration, and potential environmental impacts, thereby informing the prioritisation of recovery measures. The use of digital tools and artificial intelligence methods is emphasised for the rapid analysis of large data sets, risk prediction, and the organisation of effective crisis response. An ecologically balanced response framework is proposed, incorporating integrated energy-environmental audits, contemporary management models, and intelligent systems. These audits serve not only to assess energy efficiency but also to evaluate the ecological compliance of emergency power sources, ventilation systems, and thermal insulation. Scenario modelling for resilience involves multifactorial analysis across technical, environmental, and social dimensions, enabling the adaptation of response strategies to varying threat levels. Social impact assessment considers population vulnerability, access to essential resources, psychological wellbeing, and institutional trust. This approach not only safeguards basic living conditions during wartime but also lays the foundation for Ukraine's green recovery. The findings may inform the refinement of regulatory frameworks, the development of housing adaptation strategies, and the advancement of environmentally oriented energy policy.*

***Key words:** energy security, integrated environmental assessment, residential infrastructure resilience, energy-environmental auditing, green recovery.*

Р.О. Гамоцький

Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В МЕХАНІЗМИ ПРОТИДІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ЗАГРОЗАМ ЖИТЛОВИМ БУДІВЛЯМ

***Анотація.** У статті досліджено інтеграцію екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям, що набуває особливої актуальності в умовах повномасштабної війни. Масові атаки на критичну інфраструктуру призводять до перебоїв з енергопостачанням, використання аварійних джерел енергії, посилення забруднення довкілля та накопичення небезпечних відходів, включаючи радіаційні ризики. У таких умовах забезпечення енергетичної стабільності має супроводжуватися екологічною відповідальністю та дотриманням принципів сталого розвитку. Проаналізовано сучасні підходи до енергоефективності, які враховують екологічні наслідки та сприяють підвищенню стійкості житлової інфраструктури. Особливу увагу приділено стратегічному плануванню, що включає екологічний моніторинг, аналіз пошкоджень, моделювання сценаріїв стійкості та соціальні аудити. Обґрунтовано застосування методології інтегрованих оцінок впливу (Integrated Environmental Assessment, IEA) як ключового інструменту для формування екологічно збалансованої стратегії реагування на енергетичні загрози в житловому секторі. Методологія IEA дозволяє поєднати багатомірні дані про стан енергетичної інфраструктури, екологічні ризики та соціальні наслідки, забезпечуючи системну оцінку в умовах кризових сценаріїв. Акцентовано на важливості моніторингу енергопостачання як динамічного індикатора стійкості житлових будівель, що дозволяє оперативно виявляти критичні зони та прогнозувати ризики перебоїв. Аналіз пошкодження інфраструктури здійснюється з урахуванням типології будівель, матеріалів, ступеня зносу та потенційного впливу на довкілля, що сприяє пріоритетизації заходів з відновлення. Підкреслено важливість застосування цифрових інструментів і методів штучного інтелекту для оперативного аналізу великих масивів даних, прогнозування ризиків та організації ефективної кризової реакції. Запропоновано концепцію екологічно збалансованого реагування, що передбачає використання інтегрованих екологічно-енергетичних аудитів, сучасних моделей управління та інтелектуальних систем. Інтегровані енергетично-екологічні аудити розглядаються як інструмент оцінки не лише енергоефективності, а й екологічної відповідності аварійних джерел живлення, систем вентиляції та теплоізоляції. Моделювання сценаріїв стійкості включає багатофакторний аналіз, що охоплює технічні, екологічні та соціальні параметри, дозволяючи адаптувати стратегії реагування до різних рівнів загроз. Оцінка соціальних наслідків проводиться з урахуванням вразливості населення, доступу до базових ресурсів, психологічного стану та рівня довіри до інституцій. Такий підхід дозволяє не лише захистити базові умови життя населення в умовах війни, а й закласти основу для зеленого відновлення України. Результати дослідження можуть бути використані для удосконалення нормативно-правових актів, розробки стратегій адаптації житлового фонду до нових викликів та формування екологічно орієнтованої політики в енергетичному секторі.*

***Ключові слова:** енергетична безпека, інтегрована екологічна оцінка, стійкість житлової інфраструктури, енергетично-екологічний аудит, зелене відновлення.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.43-56>

Вступ

Війна суттєво підвищує ризики для енергетичної та екологічної безпеки житлових будівель. Обстріли, руйнування інфраструктури, перебої з постачанням електроенергії, тепла та води призводять до втрати стабільності енергозабезпечення, а також змушують мешканців використовувати аварійні та менш екологічні джерела енергії. Одночасно вибухи, пожежі, витоки небезпечних речовин і накопичення відходів спричиняють забруднення повітря, води й ґрунтів, що негативно впливає на здоров'я людей і стан довкілля [18].

Руйнування енергетичних об'єктів, складів пального, промислових підприємств призводить до масового потрапляння у повітря, воду та ґрунти токсичних речовин, важких металів, нафтопродуктів, які не лише погіршують якість навколишнього середовища, а й створюють безпосередню загрозу здоров'ю людей [1]. Водночас, масові пожежі, вибухи, використання дизельних генераторів та аварійне спалювання палива різко збільшують викиди парникових газів, зокрема CO₂, NO_x, CH₄, а також дрібнодисперсного пилу, що негативно впливає на якість повітря і сприяє розвитку респіраторних хвороб серед мешканців міст [12]. Особливо небезпечною є загроза радіаційного забруднення, яка виникає у разі пошкодження або загрози аварій на атомних електростанціях, таких як Запорізька АЕС. У такій ситуації радіоактивні речовини можуть поширитися на великі території, створюючи довготривалу небезпеку для здоров'я населення та екосистем.

Внаслідок руйнування будівель накопичуються великі обсяги небезпечних відходів: уламки, змішані з токсичними матеріалами (наприклад, азбестом), які складно утилізувати без шкоди для довкілля. Руйнування зелених зон, парків і лісосмуг поблизу багатоповерхових будинків знижує здатність природного середовища до самоочищення, підвищує рівень пилу, шуму, сприяє ерозії ґрунтів і погіршенню мікроклімату [13].

Енергетичні загрози також набувають особливої гостроти й комплексності. Однією з найсерйозніших небезпек є знищення або пошкодження енергетичної інфраструктури – електростанцій, підстанцій, тепломереж, газопроводів. Масовані атаки чи диверсії на ці об'єкти призводять до масштабних і тривалих відключень електроенергії та тепла, що унеможлиблює стабільне функціонування багатоповерхових будинків. У таких умовах мешканці залишаються без світла, опалення та часто без водопостачання, оскільки більшість систем водопідйому та каналізації залежать від електроенергії. Перебої з постачанням палива (газу, вугілля, дизеля) ще більше загострюють ситуацію: дефіцит цих ресурсів унеможлиблює роботу котельень та аварійних генераторів, що особливо критично в зимовий період, коли ризик замерзання будинків і систем водопостачання зростає в рази.

Додатковим чинником є зростання аварійності старого житлового фонду: значна частина багатоповерхових будинків була зведена понад 40–60 років тому, а їхній технічний стан часто незадовільний [19]. У разі перебоїв з енергопостачанням такі будівлі стають особливо вразливими до аварій, руйнувань інженерних мереж, проривів труб і навіть пожеж. Це ускладнюється зростанням навантаження на старі інженерні мережі, які часто не пристосовані до роботи в умовах масових руйнувань і перебоїв з енергопостачанням. Пошкодження інженерних мереж ускладнює доступ до чистої води, сприяє забрудненню ґрунтів і підземних вод, підвищує ризик інфекційних захворювань.

Всі перелічені фактори в сукупності створюють серйозні загрози для безпеки, здоров'я та життєзабезпечення мешканців багатоповерхових будинків у воєнний час, а також ускладнюють організацію оперативної допомоги та відновлення інфраструктури. У таких умовах критично важливо розробити ефективні управлінські рішення, які дозволять своєчасно реагувати на аварійні зміни.

Постановка завдання

Метою цього дослідження є обґрунтування необхідності інтеграції екологічної безпеки в механізми реагування на енергетичні загрози житловим будівлям, з урахуванням сучасних викликів, принципів сталого розвитку та потенціалу цифрових технологій в умовах війни. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до забезпечення енергетичної безпеки житлових будівель з урахуванням екологічних наслідків та ризиків, що виникають в умовах воєнних дій;
- оцінити роль екологічного чинника у стратегічному плануванні та прийнятті рішень щодо протидії енергетичним загрозам;
- визначити ефективні практики поєднання енергоефективних заходів з екологічною відповідальністю, що сприяють підвищенню стійкості житлової інфраструктури;
- розглянути можливості застосування цифрових інструментів та штучного інтелекту для моніторингу, аналізу та прогнозування екологічно-енергетичних ризиків;
- запропонувати рекомендації щодо вдосконалення методів реагування, які базуються на екологічно збалансованому та інтегрованому підході до управління ризиками.

Результати досліджень

Війна створює низку серйозних енергетичних і екологічних загроз, які безпосередньо впливають на нормальне функціонування житлових будівель і здоров'я їхніх мешканців. Знищення енергетичної інфраструктури, перебої з постачанням електроенергії, тепла чи води, а також забруднення повітря, води та ґрунтів внаслідок бойових дій чи руйнування промислових об'єктів підривають стабільність і безпеку. Саме тому надзвичайно важливо одночасно відстежувати як енергетичні, так і екологічні загрози, адже вони є запорукою підтримки базових умов життя, збереження здоров'я населення як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. Для ефективного управління варто насамперед детально проаналізувати ризики, які суттєво впливають як на безпеку мешканців, так і на довкілля під час війни.

Методологія інтегрованих оцінок впливу на довкілля (Integrated Environmental Assessment, IEA) забезпечує комплексний підхід до аналізу та управління стійкістю території та об'єктів (рис. 1). Вона забезпечує одночасне дослідження стану енергетики, екологічної ситуації, ризиків для здоров'я населення та соціально-економічних факторів. Особливість IEA створюється в поєднанні кількісних та якісних методів аналізу, що дозволяє виявити

взаємозв'язки між різними сферами діяльності – наприклад, як енергетичні рішення впливають на довкілля, здоров'я людей і соціальну безпеку. У зв'язку з цим необхідно визначити, які саме методи оцінки енергетичної безпеки доцільно застосовувати під час воєнних загроз і які екологічні чинники можуть бути враховані в цьому процесі.



Рис. 1. Екологічна оцінка в системі енергозабезпечення житлових будівель в умовах воєнних загроз

Моніторинг енергопостачання. Моніторинг енергопостачання полягає у систематичному відстеженні частоти, тривалості та масштабів відключення електроенергії, тепла й газу, що дозволяє оперативно виявляти найуразливіші райони та періоди найбільшого дефіциту ресурсів. Особливу роль відіграє аналіз аварійних графіків відключень, які впроваджуються у відповідь на атаки чи пошкодження енергетичної інфраструктури. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати масштаби проблеми, а й планувати заходи для мінімізації негативних наслідків для мешканців, своєчасно запускати резервні джерела енергії та координувати відновлювальні роботи [1].

Через різку зміну структури енергоспоживання, відключення централізованого енергопостачання, часто масово підвищується використання дизель-генераторів, твердого палива чи інших аварійних джерел енергії. Це супроводжується зростанням викидів шкідливих речовин у повітря (CO₂, NO_x, сажі, чадного газу), що погіршує якість атмосфери в житлових районах. Окрім аварійних джерел енергії, резервні системи через підвищене напруження також підвищують ризики забруднення повітря. Додатково, в періоди відключень може підвищуватись шумове навантаження та ризик витоків пального. Зіставлення даних про відключення енергії з показниками якості повітря чи рівнем шуму дозволяє встановити, коли і де зростає екологічне навантаження на довкілля. Завдяки моніторингу можна прогнозувати обсяги споживання палива та ресурсів, що спричиняють додаткові викиди. Аналізуючи, як змінюється екологічна ситуація після відновлення централізованого енергопостачання, можна оцінити ефективність енергетичних рішень з точки зору зменшення негативного впливу на довкілля. Регулярний моніторинг дозволяє спрогнозувати на майбутнє, за яких умов і в яких районах можуть виникати певні екологічні проблеми, пов'язані з аварійним енергоспоживанням.

Аналіз пошкодження інфраструктури. Аналіз пошкоджень інфраструктури житлового фонду під час війни передбачає детальне вивчення обсягів руйнувань ключових об'єктів – електростанцій, ліній електропередач, котелень, які забезпечують енергопостачання багатоповерхових будинків. Для цього використовуються дані про фактичні пошкодження, отримані як від місцевих органів влади, так і за допомогою супутникового моніторингу. Особливу увагу приділяють картографуванню зон із найбільшими втратами та пошкодженнями, що дозволяє оперативно визначати пріоритетні напрямки для відновлення інфраструктури, планувати розподіл ресурсів і організувати допомогу населенню. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати масштаби руйнувань, а й забезпечувати ефективне реагування на критичні ситуації, підвищуючи стійкість житлового фонду до подальших загроз.

Аналіз пошкоджень енергетичної інфраструктури може слугувати важливим джерелом інформації про стан довкілля. Руйнування електростанцій, ліній електропередач, котелень, складів пального чи промислових об'єктів часто супроводжується витоками небезпечних речовин, пожежами, забрудненням повітря, води та ґрунтів. Саме тому детальне картографування та документування пошкоджень дозволяє робити висновки про потенційні та фактичні екологічні наслідки [3]. Фіксація руйнувань на об'єктах енергетики чи промисловості, або ж прогнозування таких руйнацій, дозволяє визначити ймовірні точки викиду токсичних речовин (нафтопродуктів, важких металів, хімікатів). Аналізуючи площу об'єктів енергетичної інфраструктури та інтенсивність руйнувань, можна прогнозувати обсяги потенційного забруднення повітря (наприклад, під час пожеж), а також ризики потрапляння шкідливих речовин у воду, ґрунти, що знаходяться біля житлової забудови. Картографування таких зон дає змогу визначити території, які потребують пріоритетного екологічного моніторингу, прогнозування сценаріїв очищення або модернізації наявних технологій. Аналогічно з попереднім методом, можна провести аналіз зміни екологічних ситуацій після руйнацій та оцінити ефективність методів реагування. Це дозволяє прогнозувати розвиток подій на аналогічних об'єктах інфраструктури, що може включати тривале накопичення небезпечних відходів, деградацію ґрунтів, втрати біорізноманіття, екологічний слід від відновлення об'єктів та інше.

Інтегровані енергетично-екологічні аудити. Інтегровані екологічно-енергетичні аудити забезпечують комплексний підхід, який одночасно охоплює аналіз енергоспоживання будівель, оцінку вразливості інфраструктури та визначення екологічних ризиків, таких як забруднення повітря, води, ґрунтів і накопичення відходів. Проведення таких аудитів передбачає комплексну перевірку енерговикористання, дозволяє виявити слабкі місця у функціонуванні будівель і інженерних систем, а також розробити ефективні комплексні заходи для підвищення енергоефективності, зниження негативного впливу на довкілля та забезпечення стійкості інфраструктури до зовнішніх загроз. Під час аудиту здійснюється вимірювання тепловтрат через огорожувальні конструкції, аналізується стан інженерних систем (опалення, вентиляції, гарячого водопостачання), а також визначається клас енергоефективності будівлі відповідно до чинних національних стандартів. Це дозволяє виявити слабкі місця в енергоспоживанні, запропонувати шляхи оптимізації, диверсифікації ризиків та підвищити комфорт проживання мешканців [6].

Моделювання сценаріїв стійкості. Моделювання сценаріїв стійкості являє собою масштабніший аналіз та прогнозування і включає дані з попередніх вузьконаправлених методів аналізу [16]. Моделювання сценаріїв стійкості житлових будівель передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу споживання енергії в різних умовах, зокрема за наявності чи відсутності централізованого енергопостачання, а також при роботі резервних джерел, таких як генератори. Такий підхід дозволяє оцінити, наскільки житло здатне забезпечити комфорт і безпеку мешканців під час надзвичайних ситуацій. Додатково моделюється вплив впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних панелей і теплових насосів, на загальну стійкість будівлі. Це дає змогу визначити оптимальні рішення для підвищення енергонезалежності та зниження екологічного впливу житлового фонду.

Оцінка соціальних наслідків. Оцінка соціальних наслідків втрати енергопостачання житлових будівель включає аналіз кількості домогосподарств, які залишилися без доступу до електроенергії, та тривалості таких періодів. Важливими аспектами є вивчення впливу на фізичне та психічне здоров'я мешканців: від порушення сну, підвищення рівня стресу і тривожності до загострення хронічних захворювань і зниження імунітету, що особливо критично для вразливих груп населення. Також оцінюються зміни в умовах проживання, наприклад, відсутність опалення, водопостачання чи можливості приготування їжі, що призводить до погіршення якості життя. В умовах тривалих перебоїв з енергопостачанням зростає рівень міграції населення, коли люди змушені залишати свої домівки в пошуках безпечніших і комфортніших умов. Основними індикаторами для оцінки соціальних наслідків є: кількість і частка домогосподарств, що зазнали відключень; середня тривалість періодів без енергопостачання; зміни у стані здоров'я населення; рівень звернень по соціальні та медичні послуги; частота вимушених переміщень; а також рівень задоволеності умовами проживання.

Використання ШІ. У сучасних умовах зростаючої військової нестабільності виникає об'єктивна потреба в нових підходах до аналізу ризиків і дедалі більш актуальним стає застосування штучного інтелекту (ШІ) для оцінювання воєнних загроз. Сьогодні він стає одним із ключових інструментів або слугує допоміжним для оцінки та мінімізації військових загроз щодо житлових будівель. Його можливості значно розширюють стандартні підходи до аналізу ризиків, підвищують точність прогнозів і можуть оперативно реагувати на надзвичайний контекст.

ШІ відіграє ключову роль у сучасній оцінці військових загроз для житлових будівель, забезпечуючи новий рівень точності, швидкості та комплексності аналізу. Завдяки здатності обробляти величезні масиви даних із різноманітних джерел – супутникових знімків, сенсорних мереж, камер відеоспостереження, даних із дронів, соціальних мереж і відкритих джерел розвідки – ШІ дозволяє виявляти потенційні загрози, такі як переміщення військової техніки, пошкодження інфраструктури чи зміни в навколишньому середовищі, які могли б залишитися непоміченими при ручному аналізі. Використовуючи алгоритми машинного навчання, ШІ моделює сценарії розвитку подій, оцінює ймовірність ураження будівель, масштаби можливих руйнувань і наслідки для мешканців. Це критично важливо для своєчасного планування евакуації та підготовки захисних заходів. Оперативність систем ШІ проявляється

у можливості працювати в реальному часі: автоматично виділяти ключову інформацію про нові загрози чи пошкодження, швидко передавати ці дані відповідним службам для організації рятувальних операцій, розподілу ресурсів та інформування населення [5].

ІІІ не лише фіксує факт загрози, а й моделює можливі сценарії її розвитку – наприклад, прогнозує ситуацію у разі руйнування інфраструктури, відключення енергопостачання чи виникнення пожежі. Це дозволяє розробляти ефективні стратегії реагування та мінімізувати втрати. Інтелектуальні системи автоматизують процеси прийняття рішень: від розподілу рятувальних ресурсів до оптимізації маршрутів евакуації та доставки гуманітарної допомоги, що особливо важливо в умовах обмеженого часу та ресурсів [2].

У системі штучного інтелекту для виявлення загроз дані надходять з великої кількості джерел – це можуть бути супутникові знімки, результати радарних спостережень, сигнали зв'язку та відкриті джерела (OSINT) для військових ризиків; сенсорні мережі для контролю стану повітря, води, ґрунту і метеорологічні дані – для екологічних загроз; показники з датчиків, SCADA-систем і промислового моніторингу для енергетичних ризиків. Вся ця інформація передається до централізованого сховища або до хмарної платформи в реальному часі через захищені канали. Після цього дані проходять кілька етапів підготовки: фільтруються та очищаються від «шуму», нормалізуються формати, усувається дублювання й проводиться верифікація джерел, синхронізуються часові мітки та просторове позиціонування. У такому вигляді масив даних передається до аналітичних модулів.

Системи машинного навчання аналізують цей масив, розпізнають патерни або аномалії, коригують моделі, моделюють ймовірні сценарії розвитку подій та оперативно зіштовхують дані різних підсистем для комплексної оцінки (наприклад, зв'язування військових атак з енергетичними збоями та екологічними наслідками). Висновки, прогнози та тривоги надсилаються далі до модулів прийняття рішень.

В цьому модулі формуються рекомендації для операторів, кризових центрів, командування чи муніципальних служб; автоматично або напівавтоматично надсилаються відповідні сигнали для запуску резервних систем, евакуації, інформування громадськості, залучення сил безпеки. Інформація подається у вигляді інтуїтивних дашбордів, сповіщень, сценаріїв дій для фахівців. Система одержує зворотний зв'язок – тобто результати реагування людей та техніки – і на основі цього самонавчається й адаптує свої моделі. Всі потоки даних концентруються у дата-центрі або хмарній екосистемі, а взаємодія між підсистемами забезпечується через API з наскрізним логуванням і аутентифікацією (рис. 2).

Таким чином, більшість з описаних методологій виявлення енергетичного чи екологічного впливу від військових загроз ІІІ може активно використовувати у своїй роботі по реагуванню на надзвичайні ситуації. Завдяки подібним прогнозам і моделюванню ризиків підвищується готовність до надзвичайних ситуацій, дозволяючи урядам, службам цивільного захисту та мешканцям краще підготуватися до можливих атак, що зменшує кількість жертв і матеріальних збитків [15]. На практиці це проявляється у використанні ІІІ для аналізу супутникових знімків та ідентифікації зруйнованих житлових будівель після обстрілів, у впровадженні автоматизованих систем

моніторингу, які виявляють пошкодження інженерних мереж і прогнозують їхній вплив на життєзабезпечення населення, а також у моделюванні сценаріїв евакуації з урахуванням реального стану доріг, наявності укриттів і розташування небезпечних зон.

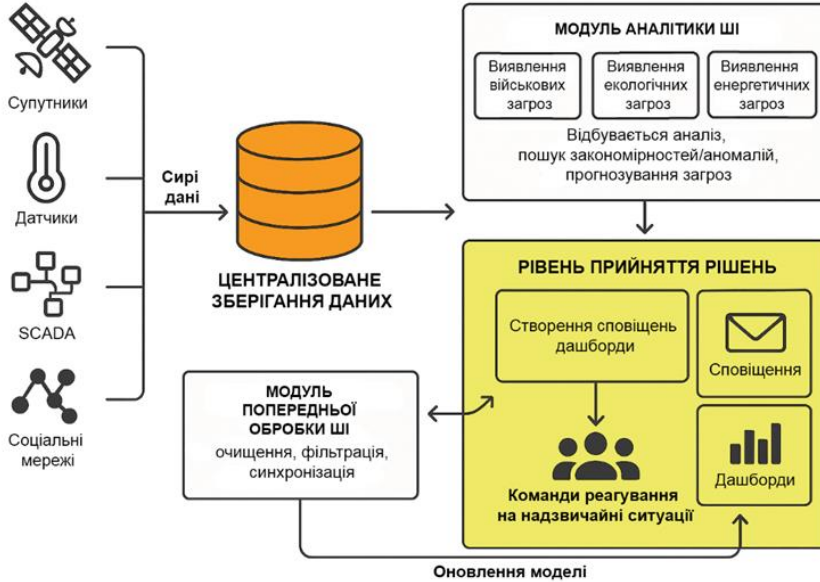


Рис. 2. Структура роботи із системою штучного інтелекту в області реагування на надзвичайні ситуації

Завдяки здатності аналізувати масиви непрямих даних, таких як звіти, повідомлення у соціальних мережах, фото та відео, ШІ може виявляти приховані джерела забруднення або зміщення екосистем, які важко виявити традиційними методами спостереження. Такі цифрові інструменти забезпечують швидкість і масштабність моніторингу, дозволяють оперативно отримувати достовірні оцінки стану довкілля та виявляти навіть неочевидні екологічні ризики. Завдяки таким можливостям, використання штучного інтелекту під час війни сприяє не лише ефективнішому екологічному моніторингу, а й прийняттю більш зважених рішень для захисту навколишнього середовища, прогнозуванню довгострокових наслідків та мінімізації загроз для здоров'я населення.

Дискусія

Сучасна практика та досвід військових конфліктів свідчать про необхідність застосовування інтегрованих підходів, які одночасно дозволяють оцінювати вплив військових загроз на енергетичну та екологічну стійкість. Це означає, що при аналізі вразливостей енергетичних систем потрібно враховувати потенційний вплив аварій, перебоїв чи аварійного використання альтернативних джерел енергії на довкілля. Наприклад, оцінка енергетичної безпеки має включати аналіз ризику забруднення від генераторів, витоків пального, аварійних викидів, а також визначати, наскільки впроваджені рішення відповідають принципам сталого розвитку.

Сучасні системи моніторингу та управління IEA, Smart Grid і IoT забезпечують автоматизований контроль як енергетичних потоків, так і ключових екологічних параметрів у житлових будівлях та інфраструктурі. Завдяки інтеграції інтелектуальних алгоритмів ці системи не лише фіксують потенційні загрози, а й автоматично реагують на них: вмикають резервні джерела енергії, запускають системи очищення повітря та води, а також оперативно попереджають мешканців про небезпеку [7]. Це підвищує рівень захищеності та стійкості житлового фонду до зовнішніх викликів і надзвичайних ситуацій.

Прикладом впровадження системи розумного енергомоніторингу є використання програмованого логічного контролера Brainboxes BV-400 для відслідковування споживання енергії на окремих ділянках підприємства і пристроях виробництва автомобільного освітлення у 2024 році. Зібрані дані автоматично агрегуються в центральній системі й аналізуються разом із показниками викидів CO₂. Це дає можливість виявити ділянки з найбільшими втратами енергії та викидами, оцінити, як зміни в графіках споживання впливають на обсяг викидів і екологічний слід підприємства. Результатом стало зниження енергоспоживання, скорочення викидів CO₂ та підвищення прозорості екологічної звітності [4].

При дослідженні двох багатоквартирних житлових будинків міста Торонто (Канада) було проведено енергетичний аудит, який включав оцінку споживання енергії, викидів парникових газів та інших екологічних показників [17]. На основі аудиту запропоновано енергоефективні заходи, що дозволили зменшити енергоспоживання та скоротити викиди CO₂. Аналіз екологічного впливу проводився за допомогою методології оцінки життєвого циклу (LCA), що дало змогу кількісно оцінити зменшення негативного впливу на довкілля після впровадження енергозберігаючих рішень [10].

Енергетичний аудит адміністративної будівлі університету у місті Таркова (Гана) показав, що впровадження оптимізованих систем освітлення та кондиціонування дозволило знизити загальне споживання енергії на 24%, а також зменшити викиди CO₂ на більш ніж 62 тонни на рік. Це стало можливим завдяки детальному аналізу енергетичних і екологічних показників під час аудиту [7].

У Чилі дослідження соціального житла включало оцінку енергетичних витрат, екологічного впливу протягом життєвого циклу будівлі та соціальних наслідків для мешканців. Виявлено, що впровадження енергоефективних рішень (утеплення, сучасні системи опалення) не лише знижує енергоспоживання та викиди, а й покращує умови проживання, зменшує витрати на енергію та підвищує задоволеність мешканців житлом [14].

Моделювання різних сценаріїв енергоспоживання з урахуванням використання відновлюваних джерел енергії, пасивної ізоляції та рекуперації тепла було застосовано у модернізованому житловому комплексі BedZED (Велика Британія). Аналіз показав, що завдяки впровадженню цих рішень вдалося знизити споживання енергії та викиди CO₂ на 70% у порівнянні з традиційними житловими комплексами. BedZED став еталоном для подальших екологічних проєктів і довів ефективність сценарного моделювання для оцінки екологічного впливу житла [9].

В Україні у 2022–2023 роках вже проводились практики одночасного аналізу енергетичних пошкоджень та екологічного впливу. Після масованих атак в певних районах супутникові дані та звіти місцевої влади

використовували для картографування зон із найбільшими руйнуваннями електростанцій, підстанцій, нафтобаз, промислових об'єктів [8]. На основі цієї інформації екологічні служби проводили відбір проб повітря, води та ґрунтів, де були зафіксовані витoki пального, токсичних речовин чи пожежі. Аналіз результатів дозволив виявити підвищені концентрації шкідливих речовин, оцінити масштаб екологічної шкоди та спрогнозувати ризики для здоров'я населення та довкілля. Це дозволяє виділяти території пріоритетного екологічного моніторингу та очищення, що потребують планів швидкого реагування чи модернізації [11].

В умовах війни такі рішення стають основою для збереження життєдіяльності міст і сіл, захисту здоров'я людей і мінімізації довгострокових втрат для економіки та довкілля. Оперативний моніторинг і гнучке реагування дозволяють не лише зменшити наслідки руйнувань, а й підвищити стійкість житлового фонду до майбутніх викликів, забезпечуючи базову безпеку та екологічну збалансованість навіть у найскладніших обставинах.

Висновки

Інтеграція екологічної складової в стратегічне планування енергетичної безпеки є необхідною вимогою в умовах війни, коли ризики для довкілля та інфраструктури зростають одночасно з загрозами для життя і здоров'я людей.

Сучасні підходи до енергоефективності повинні враховувати не лише технічні, а й екологічні аспекти, зокрема вплив аварійних джерел енергії, забруднення та накопичення небезпечних відходів, що дозволяє зменшити довгострокові втрати для здоров'я населення та природного середовища.

Ефективне реагування на енергетичні загрози можливе лише за умови застосування комплексного підходу, що включає екологічний моніторинг, аналіз пошкоджень, моделювання сценаріїв стійкості та соціальні аудити для підвищення адаптивності житлових будівель до нових викликів.

Цифрові інструменти та методи штучного інтелекту відіграють ключову роль у швидкому виявленні та прогнозуванні ризиків, забезпечуючи оперативну кризову реакцію та підтримку прийняття рішень на основі великих масивів даних.

Запровадження екологічно-енергетичних аудитів, сучасних моделей управління та інтелектуальних систем є необхідною умовою для захисту базових умов життя населення та формування основ зеленої перебудови України за принципом «відбудуємо краще».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моніторингова місія ООН з прав людини в Україні. (2024, September). *Атаки на енергетичну інфраструктуру України: Шкода цивільному населенню*. https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-12/UKR_Attacks_on_Ukraine%E2%80%99s_Energy_Infrastructure_Harm_to_the_Civilian.pdf
2. Використання штучного інтелекту для передбачення та пом'якшення впливу кліматичних змін на екосистеми. (n.d.). Neuron. <https://neuron.expert/news/ai-and-climate-change-predicting-environmental-shifts/13836/uk/>
3. Київська школа економіки. (2024, April). *Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України. Станом на початок 2024 року*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf

4. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2018). *Методика визначення енергетичної ефективності будівель* (Наказ № 169 від 11.07.2018). <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18>
5. *Роль штучного інтелекту в прогнозуванні та управлінні катастрофами: нові можливості та перспективи*. (n.d.). Mediacom. <https://mediacom.com.ua/rol-shtuchnogo-intelektu-v-prognozuvanni-ta-upravlinni-katastrofami-novi-mozhливosti-ta-perspektivi/>
6. Шовкалюк, М. М., Рабенко, Є. О., & Яценко, О. І. (2025). Моделювання показників енергоспоживання багатоквартирної будівлі з використанням спеціалізованих програмних продуктів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (1), 15–24.
7. *Achieving sustainable consumption of electricity through energy audit: A case study of a public sector institution in Ghana*. (2013). *International Journal of Development and Sustainability*, 2(2), 78–89.
8. Albakjaji, M. (2022). The responsibility for environmental damages during armed conflicts: The case of the war between Russia and Ukraine. *Access to Justice in Eastern Europe*, 4(2), 82–101. <https://doi.org/10.33327/AJEE-18-5.4-a000444>
9. BioRegional Development Group. (2009). *BedZED seven years on*. https://globalwellnessinstitute.org/wp-content/uploads/2019/12/BedZEDsevenyearson_lowres.pdf
10. Chandrasekaran, V., Dvarioniene, J., Vitkute, A., & Gecevicius, G. (2021). Environmental impact assessment of renovated multi-apartment building using LCA approach: Case study from Lithuania. *Sustainability*, 13(3), Article 1542. <https://doi.org/10.3390/su13031542>
11. Goriunov, D., & Piddubnyi, I. (2024, May). *Assessment of damages and losses to Ukraine's energy sector due to Russia's full-scale invasion*. Kyiv School of Economics. https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf
12. Joint Research Centre. (2025, April 11). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en
13. Kostyuchenko, N., & Smolennikov, D. (2025). Die Energiepolitik der Ukraine: Vom braunen Energielobbyismus zum grünen Nachkriegskonjunkturprogramm. In *Das politische System der Ukraine* (pp. 267–284). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-47476-8_13
14. Navarro, I. J., O’Ryan, R., Cortés, G., & Urquiza, A. (2023). Social impacts of energy efficiency improvements in social housing: Insights from a life cycle assessment in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 397, Article 136535.
15. Rao, G. P., Krishna, P. V. R., Adithya, K. S., & Avinash, B. S. (2025). Protection and monitoring of smart grids with IoT. *E3S Web of Conferences*, 616, Article 03023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561603023>
16. *Smart energy monitoring: A case study from Brainboxes*. (n.d.). KnowHow Distrelec. <https://knowhow.distrelec.com/energy-and-power/smart-energy-monitoring-a-case-study-from-brainboxes/>
17. Taileb, A., & Sherzad, M. F. (2023). Energy audits and energy modeling as a tool towards reducing energy consumption in buildings: The cases of two multi-unit residential buildings (MURBs) in Toronto. *Sustainability*, 15(18), Article 13983. <https://doi.org/10.3390/su151813983>
18. Uhodnikova, O., Oleksenko, R., Cirella, G. T., Marchenko, O., & Azhazha, M. (2024). Ukraine’s potential for sustainable development: Exploring global implications amidst conflict and reconstruction. In *Handbook on Post-War Reconstruction and Development Economics of Ukraine* (pp. 231–248). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48735-4_12
19. Yutilova, K., & Adamski, A. (2025). War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Prace Geograficzne*, 178, 137–152. <https://doi.org/10.4467/20833113PG.25.007.21636>

Стаття надійшла до редакції 24.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 15.09.2025

REFERENCES

1. UN Human Rights Monitoring Mission in Ukraine. (2024, September). *Attacks on Ukraine's energy infrastructure: Harm to civilians*. https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-12/UKR_Attacks_on_Ukraine%E2%80%99s_Energy_Infrastructure_Harm_to_the_Civilian.pdf (in Ukrainian).
2. *Using artificial intelligence to predict and mitigate the impact of climate change on ecosystems*. (2024, August 26). *Neuron*. <https://neuron.expert/news/ai-and-climate-change-predicting-environmental-shifts/13836/uk> (in Ukrainian)
3. Kyiv School of Economics. (2024). *Report on direct infrastructure damage from destruction as a result of Russia's military aggression against Ukraine: As of early 2024*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (in Ukrainian).
4. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *Methodology for determining the energy efficiency of buildings* (Order No. 169 of July 11, 2018). <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18> (in Ukrainian).
5. *The role of artificial intelligence in disaster forecasting and management: New opportunities and prospects*. (2024, August 26). *Mediacom*. <https://mediacom.com.ua/rol-shtuchnogo-intelektu-v-prognozuванні-ta-upravlinni-katastrofami-novi-mozhливosti-ta-perspektivi/> (in Ukrainian).
6. Shovkalyuk, M. M., Rabenko, E. O., & Yatsenko, O. I. (2025). Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products. *Energy: Economics, Technologies, Ecology*, (1), 15–24.
7. *Achieving sustainable consumption of electricity through energy audit: A case study of a public sector institution in Ghana*. (2013). *International Journal of Development and Sustainability*, 2(2), 78–89.
8. Albakjaji, M. (2022). The responsibility for environmental damages during armed conflicts: The case of the war between Russia and Ukraine. *Access to Justice in Eastern Europe*, 4(2), 82–101. <https://doi.org/10.33327/AJEE-18-5.4-a000444>
9. BioRegional Development Group. (2009). *BedZED seven years on*. https://globalwellnessinstitute.org/wp-content/uploads/2019/12/BedZEDsevenyearson_lowres.pdf (in Ukrainian).
10. Chandrasekaran, V., Dvarioniene, J., Vitkute, A., & Gecevicius, G. (2021). Environmental impact assessment of renovated multi-apartment building using LCA approach: Case study from Lithuania. *Sustainability*, 13(3), Article 1542. <https://doi.org/10.3390/su13031542>
11. Goriunov, D., & Piddubnyi, I. (2024, May). *Assessment of damages and losses to Ukraine's energy sector due to Russia's full-scale invasion*. Kyiv School of Economics. https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf (in Ukrainian).
12. Joint Research Centre. (2025, April 11). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en
13. Kostyuchenko, N., & Smolennikov, D. (2025). Die Energiepolitik der Ukraine: Vom braunen Energielobbyismus zum grünen Nachkriegskonjunkturprogramm. In *Das politische System der Ukraine* (pp. 267–284). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-47476-8_13
14. Navarro, I. J., O’Ryan, R., Cortés, G., & Urquiza, A. (2023). Social impacts of energy efficiency improvements in social housing: Insights from a life cycle assessment in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 397, Article 136535.
15. Rao, G. P., Krishna, P. V. R., Adithya, K. S., & Avinash, B. S. (2025). Protection and monitoring of smart grids with IoT. *E3S Web of Conferences*, 616, Article 03023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561603023>

16. *Smart energy monitoring: A case study from Brainboxes*. (2024, August 26). *KnowHow Distrelec*. <https://knowhow.distrelec.com/energy-and-power/smart-energy-monitoring-a-case-study-from-brainboxes/> (in Ukrainian).
17. Taileb, A., & Sherzad, M. F. (2023). Energy audits and energy modeling as a tool towards reducing energy consumption in buildings: The cases of two multi-unit residential buildings (MURBs) in Toronto. *Sustainability*, 15(18), Article 13983. <https://doi.org/10.3390/su151813983>
18. Uhodnikova, O., Oleksenko, R., Cirella, G. T., Marchenko, O., & Azhazha, M. (2024). Ukraine's potential for sustainable development: Exploring global implications amidst conflict and reconstruction. In *Handbook on Post-War Reconstruction and Development Economics of Ukraine* (pp. 231–248). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48735-4_12
19. Yutilova, K., & Adamski, A. (2025). War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Prace Geograficzne*, 178, 137–152. <https://doi.org/10.4467/20833113PG.25.007.21636>

The article was received 24.06.2025 and was accepted after revision 15.09.2025

Гамоцький Роман Олегович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> **e-mail:** roman.hamotskyi@gmail.com