



*A. M. Тригуба¹, Н. Я. Коваль², І. Л. Тригуба¹, Л. С. Коваль²,
 Р. І. Олійник², І. Р. Фірман²*

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661> – А. М. Тригуба

<https://orcid.org/0000-0001-7846-2924> – Н. Я. Коваль

<https://orcid.org/0000-0002-5239-5951> – І. Л. Тригуба

<https://orcid.org/0009-0002-7600-7308> – Л. С. Коваль

<https://orcid.org/0009-0009-9846-6303> – Р. І. Олійник

<https://orcid.org/0009-0005-5840-9815> – І. Р. Фірман



trianamik@gmail.com

МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СІЛЬСЬКИХ ГРОМАД

Проблема. Визначено доцільність підвищення обґрунтованості управлінських рішень щодо розвитку критичної інфраструктури сільських громад в умовах зростання безпекових, енергетичних та екологічних викликів. Традиційні підходи до оцінювання інфраструктурної стійкості громад здебільшого базуються на окремому аналізі технічних або функціональних характеристик і не враховують комплексної взаємодії просторових, мережевих та ризикових чинників функціонування громад. Це обмежує можливість своєчасного виявлення вразливих об'єктів критичної інфраструктури та визначення пріоритетів підвищення їх стійкості. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність розроблення та використання моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, що поєднує математичне моделювання, просторовий аналіз та інструменти цифрової візуалізації.

Мета. Обґрунтувати модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка забезпечує комплексне врахування безпекових, енергетичних та екологічних чинників, дозволяє формувати інтегральний рівень інфраструктурної вразливості із адаптуванням результатів оцінювання ризику до змін стану проектного середовища громади, що лежить в основі створення ефективного інструментарію для підтримки управлінських рішень щодо підвищення стійкості територій громад.

Методи дослідження. Запропонована модель інтегрованого оцінювання ризиків ґрунтується на поєднанні системного аналізу, багатокритеріального оцінювання, математичного моделювання та просторово-мережевого аналізу. Для кількісного визначення часткових ризиків використано нормалізацію стимуляторів і дестимуляторів, вагове агрегування показників та інтегральний показник ризику. Програмну реалізацію запропонованої моделі виконано в середовищі Google Colaboratory мовою Python із застосуванням бібліотек GeoPandas, Pandas та Folium. Це дало можливість поєднати математичний розрахунок із картографічною візуалізацією результатів.

Основні результати дослідження. Розроблено модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка охоплює сім взаємопов'язаних етапів – формування інформаційної бази, первинну підготовку даних, визначення часткових ризиків, просторово-мережевий аналіз, інтегрування результатів, візуалізацію та сценарний управлінський модуль. Узагальнюючим показником моделі є інтегральний рівень ризику. Практична апробація виконана на прикладі Жовківської міської територіальної громади Львівської області. Встановлено, що для цієї громади інтегральний рівень ризику становив 0,421. Проаналізовано 42 об'єкти критичної інфраструктури. Встановлено, що 14 об'єктів критичної інфраструктури заданої громади віднесено до категорії високого ризику. Найвищі значення ризику отримано для Руда-Крехівської загальноосвітньої школи (0,69), дитячого навчального закладу (0,64), сільської ради (0,64) та Крехівської школи (0,63). Встановлено, що найбільший вплив на формування високого ризику мають безпекові та енергетичні параметри у поєднанні з просторовою вразливістю.

Висновки та конкретні пропозиції авторів. Проведене дослідження підтвердило ефективність запропонованої моделі для кількісного оцінювання інфраструктурної вразливості сільських громад та підтримки управлінських рішень щодо розвитку критичної інфраструктури. Модель дозволяє одночасно оцінювати окремі об'єкти і територіальний рівень ризику в єдиній аналітичній системі. Обґрунтовано, що для об'єктів із ризиком

понад 0,60 першочерговими є заходи резервування енергоживлення, покращення транспортної доступності до них та посилення локальних інфраструктурних вузлів. Отримані результати підтверджують придатність моделі для використання під час управління стійкістю критичної інфраструктури громад.

Ключові слова: критична інфраструктура, громада, ризик, інтегральне оцінювання, математична модель, програмна реалізація, просторовий аналіз, стійкість, управління.

A. M. Tryhuba¹, N. Ya. Koval², I. L. Tryhuba¹, L. S. Koval², R. I. Oliinyk², I. R. Firman²

¹Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

²Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

MODEL OF INTEGRATED RISK ASSESSMENT FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OF RURAL COMMUNITIES

Problem. The importance of improving the substantiation of managerial decision-making regarding the development of critical infrastructure in rural communities under conditions of increasing security, energy, and environmental challenges has been determined. Traditional approaches to assessing community infrastructure resilience are mainly based on separate analyses of technical or functional characteristics and do not take into account the complex interaction of spatial, network, and risk factors affecting community functioning. This limits the possibility of timely identification of vulnerable critical infrastructure facilities and identifying priorities for increasing their resilience. In this regard, the importance of developing and applying a model for integrated risk assessment of critical infrastructure in rural communities has been substantiated, combining mathematical modelling, spatial analysis, and digital visualization tools.

Purpose. To substantiate a model for integrated risk assessment of critical infrastructure in rural communities that ensures comprehensive consideration of security, energy, and environmental factors, enables the formation of an integrated level of infrastructure vulnerability with adaptation of risk assessment results to changes in the state of the community project environment, and serves as a basis for creating an effective decision-support toolkit aimed at increasing territorial resilience.

Research methods. The proposed integrated risk assessment model is based on a combination of system analysis, multicriteria evaluation, mathematical modelling, and spatial-network analysis. To quantitatively determine partial risks, normalization of positive and negative indicators, weighted aggregation of indicators, and an integral risk indicator were applied. The software implementation of the proposed model was performed in the Google Colaboratory environment using the Python programming language with the application of GeoPandas, Pandas, and Folium libraries. This made it possible to combine mathematical calculations with cartographic visualization of results.

Main results of the study. A model for integrated risk assessment of critical infrastructure in rural communities has been developed, covering seven interrelated stages: information base formation, primary data preparation, determination of partial risks, spatial-network analysis, integration of results, visualization, and a scenario-based management module. The generalized indicator of the model is the integrated risk level. Practical approbation was carried out using the example of the Zhovkva Urban Territorial Community. It was established that the integrated risk level for this community amounted to 0.421. A total of 42 critical infrastructure objects were analysed. It was determined that 14 critical infrastructure facilities of the selected community belong to the high-risk category. The highest risk values were obtained for Ruda-Krekhivska Secondary School (0.69), Preschool Educational Institution (0.64), Village Council (0.64), and Krekhiv School (0.63). It was established that security and energy parameters combined with spatial vulnerability have the greatest influence on the formation of high risk.

Conclusions and specific proposals of the author. The conducted study confirmed the effectiveness of the proposed model for quantitative assessment of infrastructure vulnerability in rural communities and support of managerial decisions regarding critical infrastructure development. The model makes it possible to simultaneously assess individual facilities and territorial risk levels within a unified analytical system. It has been substantiated that for facilities with a risk level above 0.60, priority measures should include backup power supply, improvement of transport accessibility, and strengthening of local infrastructure nodes. The obtained results confirm the suitability of the model for application in managing the resilience of community critical infrastructure.

Keywords: critical infrastructure, community, risk, integrated assessment, mathematical model, software implementation, spatial analysis, resilience, management.

Вступ. Функціонування критичної інфраструктури сільських громад у сучасних умовах характеризується високою залежністю від стійкості транспортних, енергетичних, комунікаційних та безпекових підсистем. У сільських територіях навіть незначні порушення у роботі окремих інфраструктурних елементів призводять до суттєвого погіршення доступу населення до базових послуг, зокрема медичної

допомоги, енергозабезпечення, водопостачання та реагування на надзвичайні події. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах зростання зовнішніх дестабілізаційних впливів, що поєднують наслідки воєнних дій, техногенних порушень, енергетичних обмежень і локальних екологічних загроз [1–3].

Традиційні підходи до оцінювання ризиків критичної інфраструктури переважно орієнтовані

на окремі галузеві сегменти (енергетичні мережі, транспортну логістику, захист об'єктів водопостачання або систем цивільного захисту). За таких умов ризику оцінюють із використанням вузькоспеціалізованих індикаторів, які не відображають реального взаємозв'язку між інфраструктурними підсистемами громади. Наприклад, зниження доступності дорожньої мережі одночасно впливає на час прибуття аварійно-рятувальних підрозділів, можливість резервного енергозабезпечення та логістику забезпечення об'єктів критичної інфраструктури ресурсами [4].

Додаткову складність створює просторовий характер ризиків. Для сільських громад досить важливим є не лише технічний стан окремого об'єкта, а й його територіальна доступність, щільність населення у зоні впливу, віддаленість від резервних центрів забезпечення та здатність системи працювати в умовах часткової втрати інфраструктурної зв'язності. Саме тому у сучасних дослідженнях науковці дедалі частіше переходять від локального аналізу до інтегрованих просторово-аналітичних моделей, які поєднують геоінформаційні дані, індикатори критичності та багатокритеріальне оцінювання ризиків [5-6].

Невирішеною залишається науково-прикладна задача інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад через відсутність універсального інструментарію, який дозволяв би одночасно враховувати різні ризики – безпекові, енергетичні та екологічні. У практиці управління сільськими громадами рішення щодо розвитку критичної інфраструктури часто приймаються фрагментарно – окремо для пожежної безпеки, окремо для резервного енергозабезпечення, окремо для поводження з органічними відходами. Такий підхід не дозволяє сформувати цілісне уявлення про реальний рівень вразливості громади [7].

Водночас, особливого значення набуває цифровізація процесів оцінювання ризиків. Використання геоінформаційних платформ, алгоритмів мережевого аналізу, моделей інтегрального оцінювання та інструментів підтримки прийняття рішень дає можливість перейти від експертних описових оцінок до формалізованих цифрових профілів ризику територій. Такі рішення особливо важливі для сільських громад, де наявні ресурсні обмеження, що зумовлює потребу в чітких пріоритетах під час визначення управлінських дій [8-9].

Водночас більшість існуючих моделей не враховує специфіки сільських територій, для яких характерні низька щільність населення, значні транспортні відстані, обмежені резервні

потужності та високий рівень залежності від окремих локальних об'єктів інфраструктури. В результаті виникає потреба у створенні інтегрованої моделі, яка дозволить формалізувати рівень ризику критичної інфраструктури з урахуванням територіальної структури громади, стану основних об'єктів критичної інфраструктури і взаємодії між інфраструктурними компонентами.

Отже, задачею є необхідність розробити модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка забезпечить комплексне врахування безпекових, енергетичних та екологічних чинників, що дозволить формувати інтегральний ризиковий профіль території та створить основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо підвищення стійкості громади.

Останніми роками проблема оцінювання ризиків об'єктів критичної інфраструктури розглядається як одна з основних у сфері забезпечення стійкості територій, особливо для сільських громад із розосередженою структурою об'єктів та обмеженими резервними ресурсами. У сучасних дослідженнях особлива увага приділяється переходу від оцінювання окремих технічних загроз до системного аналізу взаємопов'язаних інфраструктурних компонентів, що дозволяє враховувати взаємозалежність транспортної, енергетичної, комунікаційної та безпекової інфраструктури [10-12]. Саме такий підхід є визначальним для сільських громад, де порушення функціонування навіть одного інфраструктурного елемента часто призводить до каскадного зниження доступності критичних послуг.

У наукових працях дедалі активніше застосовуються мережеві підходи до оцінювання стійкості критичної інфраструктури. В основі цих рішень лежить подання інфраструктурних систем у вигляді графових структур, де вузли відображають об'єкти критичної інфраструктури, а ребра – транспортні або функціональні зв'язки між ними. Це дозволяє кількісно оцінювати ступінь вразливості системи за втрати окремих вузлів або порушення маршрутів доступу до об'єктів інфраструктури [13-14]. Для сільських територій такий підхід особливо важливий через обмежену кількість альтернативних маршрутів і високу залежність від окремих локальних центрів обслуговування.

На основі проведеного аналізу (табл. 1) узагальнено сучасні підходи до оцінювання ризиків об'єктів критичної інфраструктури. Встановлено, що більшість сучасних моделей орієнтована або на технічну надійність окремих систем, або на просторове моделювання

доступності, тоді як інтегроване врахування різномірних ризиків залишається обмеженим [15–16]. Особливо це стосується поєднання

енергетичних, безпекових та екологічних індикаторів у межах єдиного цифрового профілю території.

Таблиця 1

Результати аналізу наукових досліджень у різних сферах стосовно оцінювання ризиків об'єктів критичної інфраструктури

Сфера досліджень	Основні ідеї та досягнення	Сильні сторони	Прогалини та обмеження
Аналіз стійкості об'єктів критичної інфраструктури [13–14]	Мережеве представлення інфраструктурних систем, оцінювання вузлової вразливості	Висока аналітична точність	Недостатнє врахування просторової специфіки сільських громад
GIS-моделювання територій [15–16]	Просторове оцінювання доступності об'єктів і маршрутів	Візуалізація зон ризику	Обмежене врахування функціональної взаємодії інфраструктур
Енергетична стійкість [17–18]	Оцінювання резервування енергетичних систем і критичності споживачів	Практична орієнтація для критичних об'єктів	Слабка інтеграція з безпековими параметрами
Безпекові системи реагування [19]	Аналіз часу прибуття рятувальних підрозділів	Орієнтація на оперативне реагування	Відсутність інтеграції з іншими ризиками
Екологічне оцінювання територій [20]	Виявлення екологічно чутливих зон	Врахування локальних впливів	Недостатній зв'язок із критичною інфраструктурою

Суттєвого розвитку в останні роки набули підходи, пов'язані з використанням геоінформаційних систем для просторової оцінки критичності територій. За допомогою цифрових моделей дорожньої мережі, даних про щільність населення, локалізацію об'єктів критичної інфраструктури і характеристик доступності до них, дослідники формують карти ризику, що дозволяють ранжувати території за рівнем вразливості [15]. Однак більшість таких рішень орієнтується переважно на транспортну доступність без глибокого врахування функціональної взаємозалежності між енергетичними, екологічними та безпековими складовими.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із забезпеченням енергетичної стійкості об'єктів критичної інфраструктури. У сучасних роботах оцінюється здатність інфраструктури функціонувати в умовах часткової втрати зовнішнього енергозабезпечення, резервування потужностей та сценаріїв локальної автономності [17–18]. Проте навіть ці підходи здебільшого не інтегруються із системами оцінювання доступності аварійного реагування або екологічних ризиків.

У сфері безпеки територій та громад значна увага приділяється моделюванню оперативної доступності рятувальних підрозділів, визначенню зон покриття територій і прогнозуванню часу реагування на надзвичайні події [19]. Для сільських громад ці параметри є визначальними, однак такі моделі орієнтовані переважно на

окремі служби реагування на надзвичайні події і не формують інтегральної картини загальної інфраструктурної вразливості.

Екологічні підходи дедалі частіше включають оцінювання локальних чинників ризику, що передбачають потенційне накопичення органічних відходів, близькість до водних ресурсів, чутливість земель до вторинного забруднення [20]. Разом з тим, ці показники рідко інтегруються в загальні системи оцінювання об'єктів критичної інфраструктури, хоча в умовах сільських громад вони безпосередньо впливають на стійкість території.

Отже, на основі проведеного аналізу сучасних наукових праць встановлено, що існує потреба у розробленні моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка системно враховуватиме стан їхньої транспортної мережі, передбачатиме геоінформаційне моделювання, що забезпечить оцінювання енергетичної стійкості із врахуванням екологічних обмежень.

На даний час залишається невирішеною науково-прикладна задача створення інтегрованої моделі оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка б одночасно враховувала просторову доступність об'єктів критичної інфраструктури, їх функціональні вразливості, енергетичну стійкість та локальні екологічні чинники. Попри значну кількість досліджень у сфері безпеки об'єктів критичної інфраструктури, аналізу транспортної

мережі, геоінформаційного моделювання та управління ризиками, більшість із них орієнтується на окремі інфраструктурні підсистеми без формування цілісного аналітичного підходу до рівня сільських громад.

Однією з основних прогалин залишається відсутність моделей, здатних відображати взаємозалежність між різними видами інфраструктурних ризиків. На практиці задачі оцінювання транспортної доступності, обґрунтування резервного енергопостачання, визначення доступності аварійно-рятувальних підрозділів та стану екологічної вразливості територій сільських громад, зазвичай розглядаються окремо, що не дозволяє визначити сумарний рівень ризику для конкретної громади. За таких умов навіть наявність задовільного стану окремого інфраструктурного елемента не гарантує загальної функціональної стійкості системи для заданої громади.

Також спостерігається недостатня адаптація існуючих моделей до особливостей сільських територій. Більшість відомих підходів розроблялася для міських громад, де характерною є висока щільність інфраструктурних зв'язків, значна кількість альтернативних маршрутів і наявність резервних технічних потужностей. Для сільських громад характерні інші умови. Зокрема, значні відстані між населеними пунктами, локальна концентрація об'єктів критичної інфраструктури, обмежена кількість маршрутів доступу рятувальних формувань до цих об'єктів та висока залежність від окремих інфраструктурних вузлів. Це потребує використання специфічного підходу до формалізації ризиків критичної інфраструктури сільських громад.

Не менш важливою залишається задача кількісного поєднання різнорідних індикаторів. У сучасних дослідженнях безпекові, енергетичні та екологічні параметри оцінюються за різними шкалами, що ускладнює їх інтеграцію в єдиний аналітичний показник. Через це управлінські рішення часто приймаються на основі фрагментарної інформації без можливості ранжування громад за інтегральним рівнем вразливості.

Окремою прогалиною є недостатнє використання цифрових інструментів для оперативного визначення оцінок ризику. Існуючі методики часто спираються на статичні дані та не враховують змін стану дорожньої мережі, доступності інфраструктури, сезонних коливань або локальних порушень функціонування об'єктів критичної інфраструктури. Унаслідок цього отримані оцінки ризиків швидко втрачають актуальність і обмежують можливість підтримки управлінських рішень у реальному часі.

Таким чином, на відміну від існуючих підходів, запропонована модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад дає можливість врахувати:

- просторову доступність об'єктів критичної інфраструктури базуючись на фактичній транспортній зв'язності території;

- інтегровану оцінку безпекових, енергетичних та екологічних ризиків у межах єдиного показника;

- ранжування сільських громад за рівнем інфраструктурної вразливості;

- адаптацію розрахунків до динамічних змін стану територій сільських громад та їх інфраструктури;

- використання цифрових геоінформаційних даних для підтримки прийняття управлінських рішень щодо підвищення стійкості громад.

Ґрунтовна модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка забезпечує комплексне врахування безпекових, енергетичних та екологічних чинників, дозволяє формувати інтегральний рівень інфраструктурної вразливості із адаптуванням результатів оцінювання ризику до змін стану проектного середовища громади, а це стане основою для створення ефективного інструментарію підтримки управлінських рішень щодо підвищення стійкості територій громад.

Методи дослідження. Для кількісного оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад використано інтегровану модель, яка передбачає системне використання методів просторового аналізу, багатокритеріального оцінювання та вагового агрегування показників. У процесі дослідження застосовано методи системного аналізу, геоінформаційного моделювання, нормалізації показників і математичного інтегрування, що дозволило формалізувати вплив безпекових, енергетичних та екологічних чинників на рівень інфраструктурної вразливості.

Додатково використано сценарний аналіз для оцінювання впливу зміни транспортної доступності до об'єктів критичної інфраструктури, стану їх енергозабезпечення та локальних екологічних умов на інтегральний рівень ризику, що дало можливість визначити критичні зони та обґрунтувати пріоритетність управлінських рішень щодо підвищення стійкості сільських громад.

Результати. Запропонована модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад побудована як багаторівнева система послідовного перетворення просторових, інфраструктурних, енергетичних, безпекових та екологічних даних у

формалізований інтегральний показник ризику. Логіка моделі ґрунтується на переході від збору та структуризації вхідної інформації до формування часткових ризиків, урахування просторово-мережових взаємозв'язків, розрахунок інтегрального ризику та подальшої інтерпретації результатів для підтримки прийняття управлінських рішень. Структурна схема запропонованої моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад подана на рисунку 1.

Запропонована модель (рис. 1) складається із семи взаємопов'язаних етапів, кожен з яких виконує окрему функцію, що безпосередньо впливає на результати наступних етапів. На першому етапі, який на схемі позначено як блок I, формується інформаційна база для використання запропонованої моделі. До неї входять

геоінформаційні дані про межі громади, дорожню мережу, розташування населених пунктів, водних об'єктів і землекористування, а також дані про об'єкти критичної інфраструктури (заклади охорони здоров'я, школи, насосні станції, енергетичні вузли, адміністративні центри тощо). Окремо враховуються дані про показники функціонування об'єктів інфраструктури (час доїзду рятувальних формувань, стан транспортної доступності, резервне живлення, критичну потребу в енергії, інтенсивність екологічного навантаження тощо). Саме цей блок формує початкову інформаційну базу для оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад. Вихід із блоку I є вхідними даними для реалізації блоку II, що забезпечує безперервність переходу від сирих даних до аналітично придатної структури.

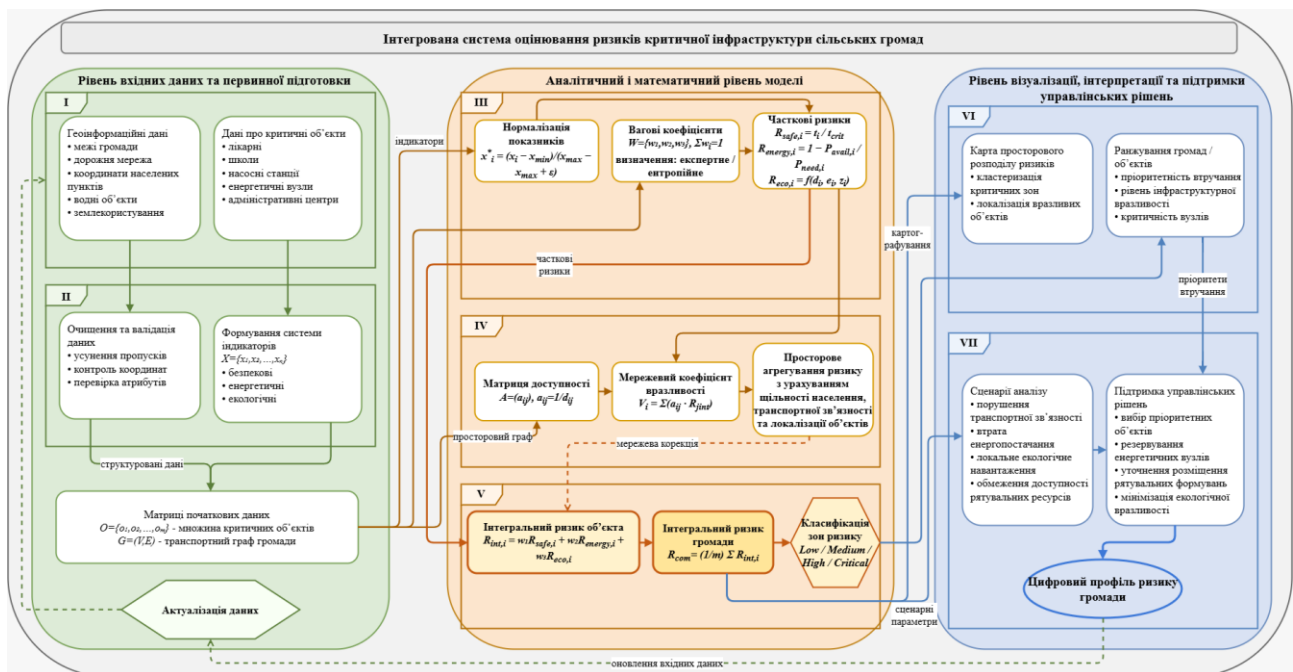


Рисунок 1 – Структурна схема моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад: I – джерела вхідної інформації; II – первинна підготовка та структуризація даних; III – формалізація та часткові ризики; IV – просторово-мережовий модуль; V – інтегральне математичне ядро моделі; VI – візуалізація та аналітичні результати; VII – сценарний та управлінський модуль

Другий етап, позначений як блок II, передбачає первинну підготовку та структуризацію отриманих даних про інфраструктуру громади. На цьому етапі здійснюється очищення інформації, усунення пропусків, перевірка координатної узгодженості, валідація атрибутивних характеристик об'єктів критичної інфраструктури та формування єдиної системи показників. Результатом цього етапу є сформована та впорядкована множина об'єктів критичної інфраструктури:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}, \quad (1)$$

де O_i – окремий об'єкт критичної інфраструктури (медичний пункт, школа, насосна станція, енергетичний вузол, адміністративний центр, пожежно-рятувальний пункт тощо), функціонування якого впливає на життєдіяльність громади;

Окрім того формується множина показників:

$$X = \{x_{sa}, x_{en}, x_{ec}, x_{ac}, x_{re}, x_{de}\}, \quad (2)$$

де x_{sa} – безпековий показник; x_{en} – енергетичний показник; x_{ec} – екологічний показник; x_{ac} – транспортна доступність; x_{re} –

резервування ресурсів; x_{de} – щільність критичних об'єктів.

Формула (2) характеризує безпекові, енергетичні та екологічні властивості території заданої громади. Також на цьому етапі формується граф транспортної мережі території громади:

$$G = (V, E), \quad (3)$$

де V – множина вузлів транспортної мережі території громади; E – множина ребер транспортної мережі території громади.

Отримані структуровані дані передаються одночасно до блоку III, у якому здійснюється формалізація показників, і до блоку IV, де враховується просторова зв'язаність території громади. Таким чином, другий етап є центральним вузлом зв'язку між інформаційним рівнем і рівнем математичного моделювання.

Третій етап, відображений на схемі як блок III, присвячений формалізації моделі та визначенню часткових ризиків. Оскільки початкові показники мають різні одиниці вимірювання та неоднорідні діапазони значень, насамперед виконується їх нормалізація. Для стимуляторів використовується залежність:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad (4)$$

Для дестимуляторів:

$$x_{ij}^* = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad (5)$$

де x_{ij} – початкове значення j -го показника для i -го об'єкта критичної інфраструктури; x_j^{\min} , x_j^{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення j -го показника в досліджуваному наборі даних; x_{ij}^* – нормалізоване значення показника, приведене до безрозмірної шкали від 0 до 1.

Після цього визначаються вагові коефіцієнти груп ризику:

$$W = \{w_1, w_2, w_3\}, \quad \sum_{k=1}^3 w_k = 1, \quad (6)$$

де w_1, w_2, w_3 – відповідають безпековому, енергетичному та екологічному блокам.

Далі для кожного критичного об'єкта обчислюються часткові ризики. Безпековий ризик доцільно визначати як:

$$R_{safe,i} = \alpha_1 \frac{t_i}{t_{crit}} + \alpha_2 (1 - c_i), \quad (7)$$

де t_i – фактичний час прибуття до об'єкта; t_{crit} – нормативний критичний час; c_i – коефіцієнт покриття території; α_1, α_2 – внутрішні ваги.

Енергетичний ризик визнається за виразом:

$$R_{energy,i} = \beta_1 \left(1 - \frac{P_{avail,i}}{P_{need,i}} \right) + \beta_2 (1 - r_i), \quad (8)$$

де $P_{avail,i}$ – доступна потужність для споживачів громади; $P_{need,i}$ – критична потреба у споживанні енергії; r_i – рівень резервування енергії.

Екологічний ризик описується залежністю:

$$R_{eco,i} = \gamma_1 \frac{1}{1 + d_i} + \gamma_2 e_i + \gamma_3 z_i, \quad (9)$$

де d_i – відстань до джерела негативного впливу; e_i – інтенсивність екологічного навантаження; z_i – коефіцієнт чутливості території.

Сукупність показників (7), (8), (9) утворює локальний ризиковий профіль об'єкта критичної інфраструктури. Важливо, що вихід блоку III передається не безпосередньо до блоку V, а спершу обробляється у просторово-мережевому модулі, що забезпечує урахування реальних територіальних взаємозв'язків у громаді.

Четвертий етап, позначений як блок IV, відображає просторово-мережевий модуль. Його завдання полягає у врахуванні того, що ризик окремого об'єкта критичної інфраструктури залежить не лише від його внутрішніх характеристик, а й від положення на транспортній мережі, відстані до інших критичних вузлів та просторової щільності інфраструктури.

На основі графа G (3) формується матриця доступності до об'єктів критичної інфраструктури на території громади:

$$A = (a_{ij}), \quad a_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}, \quad (10)$$

де d_{ij} – відстань між об'єктами i та j у транспортній мережі громади.

У подальшому визначається мережевий коефіцієнт вразливості за формулою:

$$V_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} R_j^{loc}, \quad (11)$$

де R_j^{loc} – локальний ризик суміжного об'єкта критичної інфраструктури.

Завдяки цьому забезпечується урахування каскадного впливу суміжних вузлів інфраструктури. Просторово-мережевий модуль

отримує дані з блоку II про структуру графа і дані з блоку III про часткові ризики, а потім передає просторово скориговані параметри до інтегрального математичного ядра в блоці V. Саме такий зв'язок між блоками III, IV і V забезпечує логічну завершеність усієї моделі.

П'ятий етап, який на схемі позначено як блок V, є інтегральним математичним ядром моделі. Тут відбувається агрегування часткових і просторово скоригованих ризиків у єдиний інтегральний показник. Для окремого об'єкта критичної інфраструктури інтегральний ризик визначається формулою:

$$R_{int,i} = w_1 R_{safe,i} + w_2 R_{energy,i} + w_3 R_{eco,i} + \delta V_i, \quad (12)$$

де δ – коефіцієнт впливу мережевої вразливості.

На рівні громади інтегральний ризик визначається як середнє значення:

$$R_{com} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{int,i}, \quad (13)$$

або як зважена оцінка:

$$R_{com}^w = \sum_{i=1}^n \omega_i R_{int,i}, \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \quad (14)$$

де ω_i – коефіцієнт критичності об'єкта інфраструктури громади.

У подальшому інтегральний ризик класифікується за рівнями:

$$Z = \begin{cases} \text{низький,} & 0 \leq R_{com} < \tau_1, \\ \text{середній,} & \tau_1 \leq R_{com} < \tau_2, \\ \text{високий,} & \tau_2 \leq R_{com} < \tau_3, \\ \text{критичний,} & R_{com} \geq \tau_3. \end{cases}, \quad (15)$$

Таким чином, блок V концентрує результати попередніх етапів і перетворює їх у формалізований інтегральний індикатор, який використовується для візуалізації показників ризику та під час сценарного аналізу.

Шостий етап, позначений як блок VI, призначений для візуалізації та аналітичного подання результатів оцінювання ризику. На цьому рівні інтегральні оцінки ризику перетворюються у графічні форми, зручні для інтерпретації (карти

просторового розподілу ризиків, схеми зон низької, середньої, високої та критичної вразливості, а також таблиці й аналітичні зведення щодо окремих об'єктів критичної інфраструктури тощо). Саме тут результати, отримані у блоці V, набувають прикладної форми, придатної для порівняння громад, виявлення найвразливіших зон та ранжування об'єктів критичної інфраструктури. Логічний зв'язок між блоками V і VI полягає в тому, що інтегральний показник ризику без етапу візуалізації залишається лише числовою оцінкою, тоді як його картографічне відображення забезпечує просторове розуміння проблемних ділянок громади.

Сьомий етап, представлений як блок VII, відображає сценарний та управлінський модуль. Його функція полягає у використанні результатів попередніх розрахунків для аналізу можливих сценаріїв функціонування критичної інфраструктури. На цьому етапі розглядаються сценарії зниження транспортної доступності, втрати енергопостачання, підвищення локального екологічного навантаження або обмеження доступності для рятувальних формувань. Результатом є не лише оцінка зміни інтегрального ризику, а й формування рекомендацій щодо розміщення рятувальних формувань, посилення резервного енергозабезпечення, оптимізації маршрутів доступу до об'єктів критичної інфраструктури та зниження екологічної вразливості території громади. Важливо, що блок VII пов'язаний із блоком I через зворотний зв'язок – результати сценарного аналізу вимагають актуалізації вхідних даних, уточнення параметрів моделей і повторного запуску всього циклу оцінювання. Саме ця особливість робить модель адаптивною до змін проектного середовища.

Для систематизації вхідних показників і параметрів оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад доцільно використовувати таблицю 2, яка відображає їх зміст, позначення та характер впливу на інтегральний ризик.

Таблиця 2

Вхідні показники моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад

Група показників	Показник	Позначення	Характер впливу
Безпекові	Час прибуття рятувальних формувань	t_i	Дестимулятор
Безпекові	Коефіцієнт покриття території	c_i	Стимулятор
Енергетичні	Доступна потужність	$P_{avail,i}$	Стимулятор
Енергетичні	Критична потреба в енергії	$P_{need,i}$	Дестимулятор

Продовження таблиці 2

Група показників	Показник	Позначення	Характер впливу
Енергетичні	Рівень резервування	r_i	Стимулятор
Екологічні	Відстань до джерела негативного впливу	d_i	Стимулятор
Екологічні	Інтенсивність навантаження	e_i	Дестимулятор
Екологічні	Чутливість території	z_i	Дестимулятор

Аналіз таблиці 2 показує, що система вхідних показників моделі охоплює три основні групи чинників – безпекові, енергетичні та екологічні. Вони комплексно характеризують умови функціонування критичної інфраструктури сільських громад. Безпекові показники відображають оперативність реагування та рівень просторового покриття території, енергетичні – здатність об’єктів підтримувати безперервне функціонування в умовах обмеженого ресурсного забезпечення, а екологічні – ступінь зовнішнього

впливу середовища на стабільність інфраструктурних систем. Поділ показників на стимулятори і дестимулятори забезпечує коректне застосування процедур нормалізації та подальшого інтегрування у єдиний показник ризику, оскільки це дозволяє врахувати як позитивний, так і негативний вплив окремих параметрів на загальний рівень вразливості громади.

Для представлення параметрів вагового агрегування створено таблицю 3.

Таблиця 3

Параметри інтегрованого оцінювання ризиків

Параметр	Зміст
w_1	вага безпекового ризику
w_2	вага енергетичного ризику
w_3	вага екологічного ризику
δ	коефіцієнт впливу просторово-мережевої вразливості
ω_i	коефіцієнт критичності об’єкта
τ_1, τ_2, τ_3	пороги класифікації рівня ризику

Аналіз таблиці 3 свідчить про те, що параметри інтегрованого оцінювання визначають структуру математичного агрегування часткових ризиків і забезпечують адаптацію моделі до особливостей конкретної громади. Вагові коефіцієнти дозволяють регулювати відносний вплив безпекової, енергетичної та екологічної складових, тоді як коефіцієнт просторово-мережевої вразливості враховує взаємозалежність об’єктів критичної інфраструктури у межах транспортної та функціональної мережі. Додатково коефіцієнт критичності об’єкта інфраструктури дає можливість врахувати його значення для життєзабезпечення громади, а порогові значення забезпечують інтерпретацію інтегрального показника через класи ризику для подальшого прийняття управлінських рішень.

Отже, запропонована модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад (рис. 1) має завершений логічний цикл функціонування – від збирання та

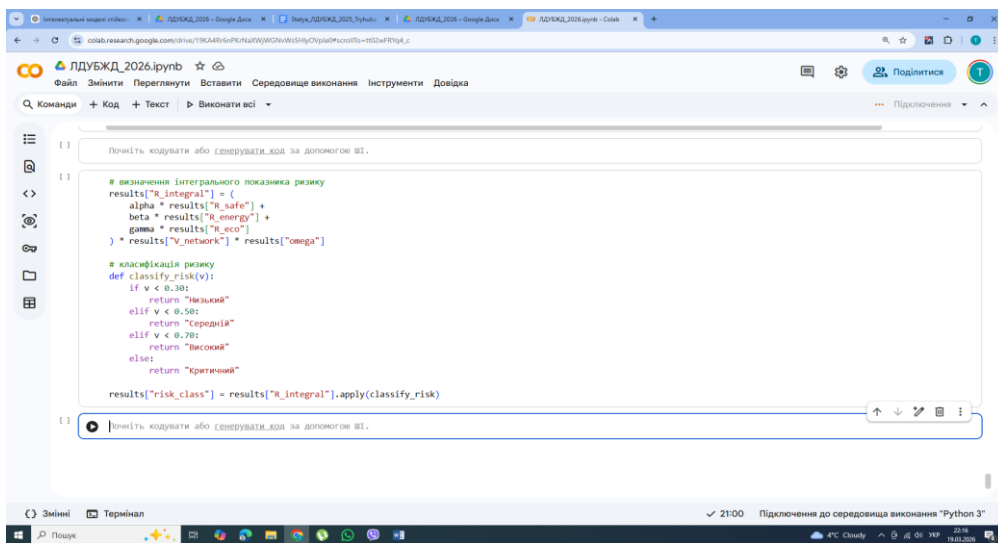
підготовки вхідних даних до формування часткових ризиків, урахування просторово-мережових взаємозв’язків, розрахунок інтегрального показника ризику, його візуалізації та використання для сценарного аналізу й підтримки прийняття управлінських рішень.

Наукова новизна запропонованої моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад полягає у поєднанні в єдиному аналітичному підході безпекових, енергетичних, екологічних та просторово-мережових характеристик функціонування об’єктів критичної інфраструктури, що дає можливість визначити інтегральний показник ризику з урахуванням взаємозалежності інфраструктурних елементів у межах заданої території громади. На відміну від існуючих, модель враховує не лише локальні параметри окремих об’єктів критичної інфраструктури, а й їхню транспортну доступність, мережеву вразливість та каскадний вплив

суміжних елементів інфраструктури. Це забезпечує об'єктивне відображення реального рівня стійкості території громади до негативних зовнішніх впливів. Новизною також є введення інтегрального математичного ядра, у якому часткові ризики агрегуються через систему вагових коефіцієнтів із додатковим урахуванням просторової зв'язаності. Це дозволяє адаптувати модель до різних типів сільських громад і використовувати її для сценарного аналізу в умовах динамічного проєктного середовища.

Для практичної реалізації моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної

інфраструктури сільських громад використано середовище Google Colaboratory, у якому створено програмну реалізацію, виконану мовою Python із застосуванням бібліотек Pandas, GeoPandas та Folium. Це дало можливість поєднати математичний розрахунок інтегрального ризику, обробку просторових даних та подальшу картографічну візуалізацію розрахованого інтегрального ризику критичної інфраструктури заданої громади. На рисунку 2 наведено фрагмент коду, що реалізує розрахунок інтегрального показника ризику через вагове агрегування часткових складових моделі.



```
1) Почніть кодувати або генерувати код за допомогою AI.
1) # визначення інтегрального показника ризику
results["R_integral"] = (
    alpha * results["R_safety"] +
    beta * results["R_energy"] +
    gamma * results["R_eco"]
) + results["V_network"] + results["omega"]

# класифікація ризику
def classify_risk(v):
    if v < 0.30:
        return "Низький"
    elif v < 0.50:
        return "Середній"
    elif v < 0.70:
        return "Високий"
    else:
        return "Критичний"

results["risk_class"] = results["R_integral"].apply(classify_risk)
1) Почніть кодувати або генерувати код за допомогою AI.
```

Рисунок 2 – Фрагмент програмної реалізації розрахунку інтегрального показника ризику критичної інфраструктури громади

Представлений програмний код (рис. 2) дозволяє автоматично класифікувати об'єкти критичної інфраструктури за рівнем ризику та використовувати отримані результати для подальшої просторової візуалізації й аналізу пріоритетів підвищення стійкості інфраструктури громади.

Для практичного оцінювання розробленої моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад вибрано об'єкт для апробації, а саме Жовківську міську територіальну громаду Львівської області. Вибір цієї громади зумовлений наявністю розвинутої мережі населених пунктів, просторово розосереджених об'єктів критичної інфраструктури, різномірної дорожньої мережі та поєднанням безпекових, енергетичних і екологічних чинників, що впливають на стійкість її функціонування. Практична реалізація моделі виконувалася на основі відкритих геоінформаційних даних OpenStreetMap, мережевого аналізу транспортної доступності, просторового оцінювання розташування об'єктів

критичної інфраструктури та розрахунку інтегрального показника ризику відповідно до наведеного математичного апарату.

Насамперед було сформовано перелік об'єктів критичної інфраструктури Жовківської міської територіальної громади, до яких віднесено заклади охорони здоров'я, школи, адміністративні будівлі, пожежно-рятувальні формування, енергетичні вузли, водогосподарські об'єкти та інші елементи інфраструктури, що мають суттєве значення для життєзабезпечення населення. Для кожного об'єкта було визначено значення вхідних показників, а саме час прибуття рятувальних формувань, коефіцієнт покриття території, рівень доступної потужності, критичну потребу в енергії, рівень резервування, відстань до джерел негативного впливу, інтенсивність екологічного навантаження та чутливість території. Подальша нормалізація цих показників дала змогу привести їх до єдиної шкали та використати в процедурі інтегрованого оцінювання ризику (рисунку 3).

Громада Жовківська міська територіальна громада	Інтегральний ризик громади 0.421 Середній	Кількість критичних об'єктів 42	Об'єктів висококритичного ризику 14
---	--	---	---

name	facility_type	travel_time_min	coverage_coef	dist_to_power_m	P_avail_proxy	reserve_level	dist_to_hazard_m	hazard_load_count	dist_to_water_m	R_safe	R_energy	R_eco	V_network	R_integral	risk_class	priority_action
0	Руда-Крехівська ЗОШ	school	15.9	1.00	9848	0.17	0.35	0	20	0.451	0.777	0.691	0.939	0.688	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
1	Без назви	water_lower	16.7	1.00	7877	0.34	0.50	0	20	0.473	0.615	0.828	0.977	0.683	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
2	Без назви	water_lower	16.7	1.00	7877	0.34	0.50	0	20	0.473	0.615	0.766	1.000	0.677	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
3	Без назви	water_lower	15.9	1.00	9916	0.16	0.50	0	20	0.451	0.736	0.685	0.944	0.676	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
4	ДНЗ	kindergarten	14.5	1.00	11832	0.00	0.30	0	20	0.412	0.910	0.399	0.882	0.643	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
5	Сільська рада	townhall	14.5	1.00	11832	0.00	0.40	0	20	0.412	0.880	0.404	0.968	0.641	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
6	Без назви	school	14.3	1.00	11747	0.01	0.35	0	20	0.406	0.890	0.460	0.791	0.629	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
7	Крехівська школа	school	13.6	1.00	7572	0.36	0.35	0	20	0.385	0.642	0.709	0.908	0.626	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
8	Фельдшерсько-акушерський пункт с. Крехів	doctors	13.6	1.00	7572	0.36	0.45	0	20	0.385	0.612	0.646	0.939	0.612	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
9	Фельдшерсько-акушерський пункт с. Філіна	doctors	17.3	1.00	4444	0.63	0.45	0	20	0.489	0.426	0.770	0.809	0.592	Високий	зменшити екологічне навантаження; підвищити мережеву стійкість
10	Без назви	school	21.2	0.94	10095	0.15	0.35	0	20	0.622	0.792	0.387	0.456	0.589	Високий	підвищити оперативність реагування; посилити резервне енергозабезпечення
11	Малопередримихівська школа	school	10.6	1.00	8923	0.25	0.35	0	20	0.301	0.722	0.620	0.552	0.533	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження
12	Без назви	school	10.3	1.00	9014	0.24	0.35	0	20	0.290	0.727	0.610	0.496	0.518	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження
13	ФАП	doctors	9.1	1.00	7388	0.38	0.45	0	20	0.256	0.601	0.825	0.492	0.514	Високий	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження
14	Замочківська школа	school	12.5	1.00	6611	0.44	0.35	0	20	0.355	0.585	0.556	0.456	0.480	Середній	поточний стан відносно стабільний
15	Вілицька школа	school	8.4	1.00	8364	0.29	0.35	0	20	0.238	0.689	0.676	0.372	0.479	Середній	посилити резервне енергозабезпечення; зменшити екологічне навантаження
16	Воля-Висоцька школа	school	5.2	1.00	6219	0.48	0.35	0	20	0.148	0.561	0.753	0.376	0.430	Середній	зменшити екологічне навантаження
17	ФАП	doctors	5.4	1.00	6369	0.46	0.45	0	20	0.154	0.540	0.734	0.369	0.425	Середній	зменшити екологічне навантаження
18	Без назви	school	7.1	1.00	7184	0.39	0.35	0	20	0.200	0.619	0.472	0.465	0.425	Середній	посилити резервне енергозабезпечення
19	Мокротинська школа	school	7.3	1.00	6744	0.37	0.35	0	20	0.200	0.619	0.472	0.465	0.425	Середній	посилити резервне енергозабезпечення

Рисунок 3 – Результати інтегрованого оцінювання ризиків об'єктів критичної інфраструктури Жовківської міської територіальної громади

Результати інтегрованого оцінювання показали, що для Жовківської міської територіальної громади узагальнений інтегральний рівень ризику становить 0,421, що відповідає середньому рівню інфраструктурної вразливості громади. У межах розрахунку було проаналізовано 42 об'єкти критичної інфраструктури, з яких 14 об'єктів віднесено до категорії високого ризику. Це свідчить про наявність локальних вузлів підвищеної інфраструктурної нестійкості, які формують основне ризикове навантаження в межах громади.

Найвищі значення інтегрального ризику зафіксовано для Руда-Крехівської ЗОШ – 0,69, ДНЗ – 0,64, сільської ради – 0,64, Крехівської школи – 0,63 та фельдшерсько-акушерського пункту с. Крехів – 0,61. Для цих об'єктів характерне поєднання підвищеного безпекового ризику, недостатнього рівня енергетичного резервування та значного впливу просторово-мережевої вразливості (рис. 4). Зокрема, у Руда-Крехівській ЗОШ безпекова складова становить 0,61, енергетична – 0,77, екологічна – 0,69, а мережевий коефіцієнт – 0,59, що формує високий підсумковий ризик.

Для частини об'єктів критичної інфраструктури із середнім рівнем ризику, зокрема Воля-Висоцької школи (0,49) та Волицької школи (0,48), спостерігається відносно нижчий вплив безпекових чинників, однак ризик залишається підвищеним через недостатній рівень резервування та просторову віддаленість від ключових інфраструктурних вузлів. Це підтверджує, що навіть за прийнятного

часу доступу окремі території громади залишаються чутливими до порушення функціонування критичних систем.

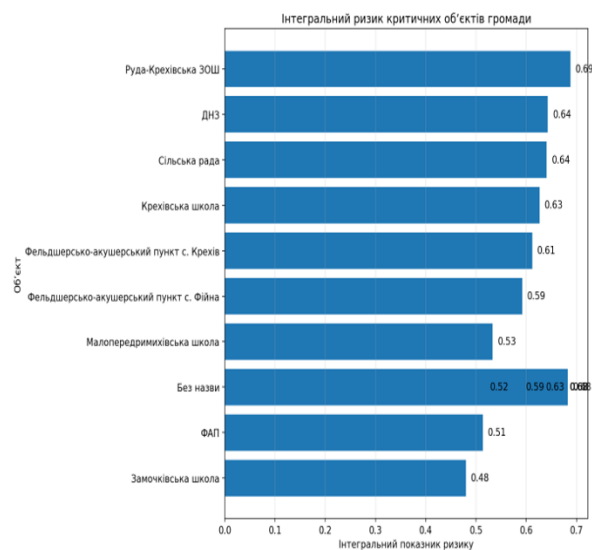


Рисунок 4 – Ранжування об'єктів критичної інфраструктури Жовківської міської територіальної громади за величиною інтегрального показника ризику

Ранжування об'єктів показує, що найбільш уразливими є переважно освітні та адміністративні установи, розташовані у периферійних частинах громади. Така конфігурація пояснюється тим, що саме ці об'єкти мають вищу залежність від стабільного енергозабезпечення та оперативного доступу служб реагування. Водночас медичні об'єкти,

попри меншу кількість, демонструють стабільно підвищений рівень ризику, що вимагає окремої уваги при плануванні заходів стійкості.

Для об'єктів із ризиком понад 0,60 першочерговим є впровадження локального резервного енергоживлення, зокрема автономних джерел живлення або дизельних резервів. Для населених пунктів, у яких зафіксовано підвищений безпековий ризик, доцільно переглянути транспортну доступність та маршрути оперативного реагування, що дозволить знизити час доїзду рятувальних формувань.

Окремої уваги потребують периферійні населені пункти, де високий ризик формується не одним чинником, а їх сукупністю. Для таких зон рекомендовано посилення локальних інфраструктурних вузлів, створення додаткових резервів енергетичної стійкості та підвищення автономності функціонування соціально значущих об'єктів.

Обговорення

Отримані результати підтвердили, що розроблена модель дозволяє не лише кількісно визначати інтегральний рівень ризику, а й локалізувати конкретні об'єкти критичної інфраструктури, які формують інфраструктурну вразливість громади. Перевагою моделі є інтеграція безпекових, енергетичних, екологічних та просторово-мережових параметрів у єдиному аналітичному середовищі, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень. Практична апробація на прикладі Жовківської міської територіальної громади показала її придатність для використання у плануванні заходів підвищення стійкості критичної інфраструктури на локальному рівні.

Висновки

1. На підставі аналізу сучасних наукових підходів до оцінювання стійкості критичної інфраструктури встановлено, що більшість існуючих методів орієнтована на окреме врахування безпекових, енергетичних або екологічних параметрів без інтеграції просторово-мережових характеристик функціонування території. У сучасних умовах зростання інфраструктурної вразливості сільських громад, обумовленої нерівномірною транспортною доступністю, енергетичними обмеженнями та локальними екологічними загрозами, такі підходи не забезпечують достатньої аналітичної повноти, що зумовило потребу у розробленні моделі інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад.

2. Обґрунтовано модель інтегрованого оцінювання ризиків критичної інфраструктури сільських громад, яка передбачає послідовну

реалізацію семи взаємопов'язаних етапів: формування вхідної інформаційної бази, первинну підготовку даних, визначення часткових безпекових, енергетичних та екологічних ризиків, просторово-мережовий аналіз, інтегрування результатів у межах математичного ядра моделі, візуалізацію результатів і формування сценарних управлінських рішень. Узагальнюючим показником запропонованої моделі є інтегральний рівень ризику, який формується через вагове агрегування часткових складових із додатковим урахуванням мережової вразливості та критичності об'єкта. На відміну від існуючих локальних методик, запропонована модель дозволяє одночасно оцінювати як окремі об'єкти критичної інфраструктури, так і територіальний рівень стійкості громади в єдиній аналітичній системі.

3. На підставі використання запропонованої моделі виконано інтегроване оцінювання ризиків критичної інфраструктури Жовківської міської територіальної громади Львівської області. Встановлено, що інтегральний ризик громади становить 0,421, що відповідає середньому рівню інфраструктурної вразливості. У межах аналізу досліджено 42 об'єкти критичної інфраструктури, з яких 14 об'єктів віднесено до категорії високого ризику. Найвищі значення інтегрального ризику отримано для Руда-Крехівської ЗОШ (0,69), ДНЗ (0,64), сільської ради (0,64), Крехівської школи (0,63) та фельдшерсько-акушерського пункту с. Крехів (0,61). Отримані результати показали, що основними чинниками формування підвищеного ризику є поєднання збільшеного часу доїзду, недостатнього рівня резервного енергозабезпечення та високої просторово-мережової вразливості. Це підтверджує ефективність розробленої моделі для обґрунтування управлінських рішень щодо визначення пріоритетів підвищення стійкості критичної інфраструктури громади, зокрема шляхом резервування енергопостачання, покращення транспортної доступності та посилення локальних інфраструктурних вузлів.

Список літератури:

1. European Commission, Joint Research Centre. *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en (2025)
2. Chychulina, K., Klymenko, V., & Klymenko, M. Challenges of infrastructure rehabilitation in Ukraine under conditions of war and sustainable recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 20(3), 245–258. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.200325> (2025)

3. Балацька, В. С., Ткачук, Р. Л., & Маслово, Н. О. Еволюція КСЗІ та інтеграція блокчейн-технологій у кіберзахисті державних інформаційних систем України. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2025. 2(30), 332–345. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.975>
4. Tryhuba, A., Demchyna, V., Ratushnyi, A., & Koval, L. Identification of priority objects for the implementation of projects to restore the transport infrastructure of settlements in the post-war period. In *Proceedings of the 5th International Workshop IT Project Management (ITPM 2024)* 2024. P. 219–231. <https://ceur-ws.org/Vol-3709/paper18.pdf>
5. Tryhuba, A., Ratushnyi, R., Ratushnyi, A., Koval, L., & Andrukhiv, D. Creating value from the implementation of project portfolios for the development of territorial security systems. *Security Forum*. 2025. 1. P. 45–58. https://doi.org/10.26410/SF_1/25/3
6. Кос, К., Ekmekcioglu, O., & Ozger, M. A GIS-based integrated multi-criteria decision analysis framework for critical infrastructure vulnerability assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. P. 108, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.104512>
7. Тригуба А. М., Ратушний А. Р., Демчина В. Р., Коваль Л. С. Особливості управління проектами відновлення транспортної та безпекової інфраструктури сільських громад у післявоєнний період. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. 28, P. 44–54. <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05>
8. Organisation for Economic Co-operation and Development. *Rural well-being: Geography of opportunities*. Paris: OECD Publishing. 2024. <https://doi.org/10.1787/d4d7f440-en>
9. Li, Y., Westlund, H., & Liu, Y. Rural resilience and infrastructure prioritization under limited public resources: A spatial governance perspective. *Journal of Rural Studies*. 2025. 104, 103214. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103214>
10. Pant, R., Hall, J. W., & Blainey, S. P. Vulnerability assessment framework for interdependent critical infrastructures under multi-hazard conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024. 245, 109923. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.109923>
11. Зачко О. Б. Теоретичні підходи до управління безпекою в проектах розвитку складних систем. *Управління розвитком складних систем*. 2015. 22, 48–53. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/1064> (дата звернення: 12.01.2026).
12. Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., & Lovecek, T. Integrated assessment of critical infrastructure elements with emphasis on cross-sector interdependencies. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2025. 48, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100683>
13. Martyn, E., Smotr, O., Burak, N., Malets, I., Kunanets, N., Pasichnyk, V., & Sachenko, A. Software for shelter's fire safety and comfort levels evaluation. In *Data Stream Mining & Processing (Communications in Computer and Information Science, 2020. Vol. 1158, pp. 370–381)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31
14. Xu, H., Ouyang, M., Wang, Z., & Zhao, L. Graph-theoretical vulnerability assessment of interdependent critical infrastructure systems under node disruption scenarios. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2025. 49, 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100701>
15. Kröger, W., & Nan, C. Critical infrastructure resilience: Limitations of sector-specific reliability models under complex disruptions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. 244, 109905. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.109905>
16. Fekete, A., Sandholz, S., & Turoff, M. Integrated multi-risk assessment approaches for critical infrastructure systems: Current gaps and future directions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. 109, 104623. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.104623>
17. Tryhuba, A., Hutsol, T., Česna, J., Tryhuba, I., Mudryk, K., Francik, S., Kukharets, S., Mishchenko, I., & Oliinyk, R. Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy. *Scientific Reports*. 2025. 15, 10777. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92836-6>
18. Ahmed, S., Ali, A., & D'Angola, A. A review of renewable energy communities: Concepts, scope, progress, challenges, and recommendations. *Sustainability*. 2024. 16(5), 1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>
19. Kobylkin, D., Zachko, O., Mytsko, R., Zakharchyshyn, S., & Elmas, Ç. Management of critical parameters of logistics and infrastructure projects by means of computer experiment (on the example of the security and defence sector under wartime conditions). *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2025. 3(33), 33–44. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.033>
20. Popovych, V. V., Skrobala, V., Tyndyk, O., Plkiv, B., et al. Modelling the seasonal dynamics of heavy metal pollution of water bodies within a mining area. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2025. 40(3), 195–208. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.3.13>

References:

1. European Commission, Joint Research Centre. (2025). *War worsens climate and*

environmental challenges in Ukraine. Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en

2. Chychulina, K., Klymenko, V., & Klymenko, M. (2025). Challenges of infrastructure rehabilitation in Ukraine under conditions of war and sustainable recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 20(3), 245–258. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.200325>

3. Balatska, V. S., Tkachuk, R. L., & Maslova, N. O. (2025). Evoliutsiia KSZI ta intehratsiia blokchein-tekhnologii u kiberzakhysti derzhavnykh informatsiinykh system Ukrainy [Evolution of comprehensive information protection systems and blockchain integration in cybersecurity of state information systems of Ukraine]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 2(30), 332–345. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.975> [in Ukrainian].

4. Tryhuba, A., Demchyna, V., Ratushnyi, A., & Koval, L. (2024). Identification of priority objects for the implementation of projects to restore the transport infrastructure of settlements in the post-war period. In *Proceedings of the 5th International Workshop IT Project Management (ITPM 2024)* (pp. 219–231). <https://ceur-ws.org/Vol-3709/paper18.pdf> [in Ukrainian].

5. Tryhuba, A., Ratushnyi, R., Ratushnyi, A., Koval, L., & Andrukhiv, D. (2025). Creating value from the implementation of project portfolios for the development of territorial security systems. *Security Forum*, 1, 45–58. https://doi.org/10.26410/SF_1/25/3

6. Koc, K., Ekmekcioglu, O., & Ozger, M. (2025). A GIS-based integrated multi-criteria decision analysis framework for critical infrastructure vulnerability assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 108, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.104512>

7. Tryhuba, A. M., Ratushnyi, A. R., Demchyna, V. R., & Koval, L. S. (2023). Osoblyvosti upravlinnia proiektamy vidnovlennia transportnoi ta bezpekovoii infrastruktury silskykh hromad u pisliavoiennyi period [Features of management of transport and security infrastructure restoration projects in rural communities during the post-war period]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 28, 44–54. <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05> [in Ukrainian].

8. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Rural well-being: Geography of opportunities*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/d4d7f440-en> (in Eng.)

9. Li, Y., Westlund, H., & Liu, Y. (2025). Rural resilience and infrastructure prioritization under

limited public resources: A spatial governance perspective. *Journal of Rural Studies*, 104, 103214. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103214>

10. Pant, R., Hall, J. W., & Blainey, S. P. (2024). Vulnerability assessment framework for interdependent critical infrastructures under multi-hazard conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 109923. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.109923>

11. Zachko, O. B. (2015). Teoretychni pidkhody do upravlinnia bezpekoiu v proektakh rozvytku skladnykh system [Theoretical approaches to safety management in projects of complex systems development]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 22, 48–53. <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/1064> [in Ukrainian].

12. Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., & Lovecek, T. (2025). Integrated assessment of critical infrastructure elements with emphasis on cross-sector interdependencies. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 48, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100683>

13. Martyn, E., Smotr, O., Burak, N., Malets, I., Kunanets, N., Pasichnyk, V., & Sachenko, A. (2020). Software for shelter's fire safety and comfort levels evaluation. In *Data Stream Mining & Processing (Communications in Computer and Information Science, Vol. 1158, pp. 370–381)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31

14. Xu, H., Ouyang, M., Wang, Z., & Zhao, L. (2025). Graph-theoretical vulnerability assessment of interdependent critical infrastructure systems under node disruption scenarios. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 49, 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100701>

15. Kröger, W., & Nan, C. (2024). Critical infrastructure resilience: Limitations of sector-specific reliability models under complex disruptions. *Reliability Engineering & System Safety*, 244, 109905. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.109905>

16. Fekete, A., Sandholz, S., & Turoff, M. (2025). Integrated multi-risk assessment approaches for critical infrastructure systems: Current gaps and future directions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 109, 104623. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.104623>

17. Tryhuba, A., Hutsol, T., Česna, J., Tryhuba, I., Mudryk, K., Francik, S., Kukharets, S., Mishchenko, I., & Oliinyk, R. (2025). Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy. *Scientific Reports*, 15, 10777. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92836-6>

18. Ahmed, S., Ali, A., & D'Angola, A. (2024). A review of renewable energy communities: Concepts, scope, progress, challenges, and

recommendations. *Sustainability*, 16(5), 1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>

19. Kobylkin, D., Zachko, O., Mytsko, R., Zakharchyshyn, S., & Elmas, Ç. (2025). Management of critical parameters of logistics and infrastructure projects by means of computer experiment (on the example of the security and defence sector under wartime conditions). *Innovative Technologies and*

Scientific Solutions for Industries, 3(33), 33–44. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.033>

20. Popovych, V. V., Skrobala, V., Tyndyk, O., Plkiv, B., et al. (2025). Modelling the seasonal dynamics of heavy metal pollution of water bodies within a mining area. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 40(3), 195–208. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.3.13>

© А. М. Тригуба, Н. Я. Коваль, І. Л. Тригуба,
Л. С. Коваль, Р. І. Олійник, І. Р. Фірман, 2026.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 20.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.