

СИСТЕМНО-СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ МАСШТАБУ РУЙНУВАНЬ І ПРОСТОРОВО-ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОШКОДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

Системно-структурний аналіз масштабу руйнувань і просторово-функціональних характеристик пошкоджених об'єктів є комплексним дослідницьким підходом, спрямованим на всебічне оцінювання деструктивних процесів, які виникають унаслідок воєнних дій, природних катастроф або техногенних аварій. Він ґрунтується на поєднанні просторових, інженерно-технічних і функціональних параметрів, що дозволяє відтворити реальну картину змін у територіальній системі. В центрі методології – інтеграція геоінформаційних технологій, дистанційного зондування Землі, математичного моделювання та об'єктно-орієнтованого аналізу, які забезпечують ідентифікацію руйнувань на основі спектральних, морфологічних та топологічних ознак.

Процес аналізу починається зі збору просторових даних: супутникових знімків, аерофотозйомки, польових обстежень. Далі відбувається класифікація об'єктів за рівнем руйнувань і за функціональними групами, що дозволяє визначити системну роль кожного елемента та оцінити наслідки його втрати. Особлива увага приділяється аналізу функціональної значущості житлових, промислових, транспортних та енергетичних структур, оскільки саме вони формують основу урбанізованої системи. Пошкодження об'єктів різної природи оцінюються через індекси відновлюваності, логістичної важливості, енергетичної залежності та системної критичності.

У роботі розглядаються підходи до оцінки просторово-функціональних порушень на основі топологічних моделей, у яких інфраструктурні об'єкти подані як вузли графа, а взаємозв'язки – як ребра з певною вагою. Функціональна цілісність системи визначається через коефіцієнти збереження зв'язків та інтегральні показники функціональної стійкості, що дозволяють оцінити глибину деструктивних впливів. Для підвищення точності застосовуються моделі, що враховують втрату як прямих, так і опосередкованих зв'язків. Системно-структурний аналіз включає також прогнозування каскадних ефектів – ситуацій, коли руйнування одного елемента запускає ланцюгову реакцію деструкції у суміжних підсистемах. У результаті формується комплексна модель, що дозволяє визначити пріоритети відновлення, оцінити системну вразливість та ідентифікувати критичні елементи, від яких залежить стабільність території.

Ключові слова: руйнування, просторовий аналіз, функціональна стійкість, ГІС-моделювання, критична інфраструктура, топологічні зв'язки, індекс пошкодження, відновлюваність.

Вступ. Сучасні деструктивні процеси, спричинені воєнними подіями, природними катастрофами або техногенними аваріями, формують складні та багатомірні виклики для урбанізованих територій. Пошкодження окремих об'єктів та інфраструктурних систем створюють ризики порушення життєдіяльності, трансформації просторових зв'язків і зниження функціональної стійкості території. У такому середовищі виникає потреба в науково обгрунтованому підході, здатному інтегрувати в єдину систему різні види інформації – від технічних характеристик будівель до просторової структури території. Саме системно-структурний аналіз дозволяє сформувати цілісне бачення процесів руйнування та визначити закономірності, які впливають на стійкість території після деструктивних подій.

У центрі цього підходу – інтеграція даних дистанційного зондування, супутникових знімків, геоінформаційних систем та математичних моделей, що дозволяють не лише ідентифікувати пошкодження, а й установити їхній вплив на функціонування територіальної системи. Значну роль відіграє класифікація об'єктів за функціональним призначенням, адже кожен тип інфраструктурних елементів виконує специфічні функції та має різний ступінь впливу на життєдіяльність території.

Урбанізована система розглядається як комплекс взаємопов'язаних вузлів і зв'язків, які формують мережу потоків ресурсів, енергії та інформації. Руйнування елементів цієї мережі, особливо транспортних, енергетичних і комунікаційних, може призводити до каскадних ефектів, що значно ускладнюють відновлення. Саме тому системно-структурний підхід передбачає не лише фіксацію ступеня руйнувань, а й аналіз взаємозалежностей між ними.

Сучасні методи обробки супутникових даних та об'єктно-орієнтований аналіз зображень забезпечують високу точність просторової ідентифікації пошкоджень. Це створює підстави для побудови індексів пошкоджень, моделей системної стійкості та інтегральних показників порушення функціональної цілісності. У підсумку системно-структурний аналіз формує інформаційну основу для стратегічного планування, реконструкції та забезпечення стійкості територій.

Актуальність дослідження визначається необхідністю комплексного аналізу масштабів руйнувань у сучасних умовах, коли територіальні системи зазнають багатовекторних деструктивних впливів. Воєнні події, природні катастрофи та техногенні аварії стають причиною не лише фізичного знищення об'єктів, а й порушення функціональних зв'язків, що забезпечують стабільність та життєздатність територій. Традиційні підходи до оцінки руйнувань, які фокусуються виключно на технічних характеристиках пошкоджених споруд, є недостатніми для розуміння системної природи негативних наслідків.

Урбанізовані системи формуються як складні мережі, де кожен об'єкт має свою роль і взаємодіє з іншими елементами. Втрата окремих вузлів може спричинити каскадні ефекти, що порушують цілісність великої кількості функціональних підсистем – енергетичних, транспортних, комунікаційних, виробничих. Тому саме системно-структурний підхід дозволяє охопити всі рівні деструкції, включаючи просторовий розподіл руйнувань, їхній вплив на мережу взаємозв'язків та зміну поведінки території після кризових подій.

Зростання можливостей цифрових технологій, дистанційного зондування й GIS-моделювання відкриває шлях для створення інтегральних моделей, що об'єднують просторові, технічні та функціональні параметри. Отже, актуальність аналізу

полягає в потребі науково обґрунтованих рішень щодо пріоритетності відновлення, зниження вразливості та підвищення стійкості пошкоджених територій.

Постановка проблеми. Проблема полягає у відсутності комплексного підходу, який би дозволяв оцінити не лише фізичний масштаб руйнувань, а й системні наслідки для територіальних структур. Пошкодження окремих об'єктів не дають повного уявлення про рівень деструкції, оскільки функціональна цілісність території формується через взаємодію інфраструктурних елементів. Бойові дії, стихійні лиха й техногенні аварії можуть спричинити каскадні відмови, коли руйнування одного об'єкта веде до порушення роботи суміжних підсистем. Недостатність традиційних методів оцінки пов'язана з тим, що вони орієнтовані на технічні характеристики пошкоджених будівель, не враховуючи функціональну значущість елементів та їхню роль у системних процесах. Це ускладнює визначення пріоритетів відновлення, прогнозування наслідків деструкції та планування реконструкційних робіт. Необхідний інструментарій, здатний оцінити втрату зв'язків, системну вразливість, індекс пошкоджень та просторово-функціональні залежності між об'єктами. Системно-структурний підхід дозволяє подолати ці обмеження, проте потребує розроблення чіткої методології, адаптованої до умов масштабних руйнувань та урбанізованих структур.

Аналіз сучасних досліджень. У наданому матеріалі системно-структурний аналіз спирається на підходи, розроблені провідними дослідниками у сфері дистанційного зондування, картографічної ідентифікації та аналізу інфраструктурних залежностей. У працях Томаса Блашке та Люс Дреґу описано методологію об'єктно-орієнтованого аналізу зображень, яка стала основою сучасного сегментування та класифікації пошкоджених об'єктів. Бісваджіт Прадхан обґрунтував застосування штучного інтелекту та машинного навчання у моделюванні ризиків і визначенні вразливості територій. Омар Даріо Кардона сформував концепцію системної вразливості, яка акцентує увагу на втраті функціональних зв'язків, а не лише матеріальних структур. У роботі також наведено аналітичні моделі, що ґрунтуються на ідеях Сааті щодо вагових коефіцієнтів у багатокритеріальних системах, а також підходи Амаратунґи, які описують взаємозалежності між критичною інфраструктурою. Невирішеними залишаються питання інтеграції різнорідних інфраструктурних мереж, моделювання каскадних ефектів та побудови прогнозних моделей відновлення.

Метою статті є формування комплексного підходу до системно-структурного аналізу масштабу руйнувань та просторово-функціональних характеристик пошкоджених об'єктів із використанням геоінформаційних, математичних та топологічних методів. Такий підхід дозволяє визначити системну роль об'єктів, оцінити втрату функціональних зв'язків, сформувати інтегральні показники стійкості території та встановити пріоритети відновлення. Особлива увага приділяється моделюванню індексів пошкодження, визначенню вагових характеристик інфраструктурних компонентів та аналізу впливу деструкції на загальну життєздатність території. У підсумку стаття спрямована на створення наукової основи для планування реконструкції та підвищення стійкості урбанізованих систем.

Виклад основної інформації. Системно-структурний аналіз масштабу руйнувань розглядає комплекс взаємопов'язаних процесів, що відображають не лише ступінь деструкції окремих елементів, але й зміну їхніх функціональних ролей у межах загальної територіальної системи. Такий підхід дозволяє інтегрувати

просторові, інженерно-технічні та соціально-економічні параметри у єдину модель, що відображає реальну картину пошкоджень і потенційні шляхи відновлення.

Аналіз починається зі збору просторових та технічних даних із використанням геоінформаційних систем, аеро- та супутникового моніторингу, а також польових обстежень. Далі здійснюється класифікація об'єктів за рівнем руйнувань (незначні, середні, критичні), а також за функціональними типами – житлові, промислові, транспортні, енергетичні, соціальні. Це забезпечує багаторівневе групування об'єктів, необхідне для подальшого моделювання зв'язків і залежностей.

Після попереднього етапу виконується формування аналітичної моделі, у якій руйнування розглядаються як зміни у системних зв'язках між об'єктами. Враховуються показники структурної стійкості, резервності та критичності елементів. Для кожного об'єкта визначаються індекси відновлюваності, логістичної важливості та енергетичної залежності, що дає можливість оцінити загальний рівень втрат у просторово-функціональному вимірі [1].

Для наочного відображення етапів проведення системно-структурного аналізу масштабу руйнувань доцільно представити процес у вигляді рис. 1. Він демонструє логічну послідовність дій – від збору та первинної обробки даних до формування системної моделі, прогнозування наслідків і розроблення стратегічних рішень щодо відновлення. Такий візуальний підхід дозволяє узгодити аналітичні, просторові та функціональні аспекти дослідження, забезпечуючи цілісне розуміння структури й динаміки деструктивних процесів у межах досліджуваної території.



Рис. 1. Системно-структурний аналізу масштабу руйнувань (розроблено автором на основі [1])

На завершальному етапі здійснюється інтерпретація результатів у вигляді аналітичних карт і структурних схем, що відображають системну взаємозалежність між об'єктами. Отримана модель може використовуватися для прогнозування ефектів каскадних руйнувань і визначення зон пріоритетного втручання. Такий підхід формує основу для науково обґрунтованої політики управління ризиками, відновленням і подальшою стійкою трансформацією урбанізованих територій після деструктивних подій.

Системно-структурний підхід до картографічної ідентифікації пошкоджень розглядає територію як складну просторову систему, у якій кожен елемент має власну функціональну значущість і взаємозалежність з іншими компонентами. Такий підхід особливо важливий у контексті воєнних руйнувань, природних катастроф або техногенних аварій, коли необхідно оперативно оцінити масштаб деструкції, визначити пріоритети відновлення та сформувавши стратегії відбудови інфраструктури [2].

Питання ідентифікації пошкоджень у системно-структурному контексті базується на поєднанні просторового аналізу, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційного моделювання. Ще у 1980–1990-х роках дослідники Томас Блашке та Люс Дрегу сформували методологію об'єктно-орієнтованого аналізу зображень (OBIA – Object-Based Image Analysis), яка стала основою для сучасних моделей картографічного аналізу руйнувань [3]. Їхні роботи довели, що просторові об'єкти можна класифікувати не лише за спектральними характеристиками, а й за структурними ознаками, контекстом і функціональним змістом, що забезпечує точніше відображення ступеня пошкодження.

Подальший розвиток методології відбувався завдяки працям таких вчених, як Бісваджіт Прадхан, який досліджував застосування штучного інтелекту та ГІС у моделюванні природних і техногенних ризиків, та Діланті Амаратунга, яка зосередила увагу на інтеграції геопросторових методів у процес відновлення інфраструктури після катастроф [4]. Їхні підходи спрямовані на поєднання картографічної інформації з даними про соціально-економічну стійкість територій, що дозволяє не лише оцінити рівень руйнувань, а й прогнозувати наслідки для системи управління ризиками.

З позиції системного аналізу, картографічна ідентифікація пошкоджень включає кілька взаємопов'язаних етапів: первинну обробку супутникових даних, фільтрацію шумів, виявлення аномалій, сегментацію зображень, визначення ступенів пошкодження об'єктів та інтеграцію результатів у геоінформаційну систему. Визначальною є ідея, що кожен об'єкт має просторову та функціональну роль, тому оцінювання повинно враховувати не лише геометрію руйнувань, а й їхній вплив на систему у цілому.

Дослідження Омара Даріо Кардони Арболеди підкреслюють важливість оцінювання не лише безпосередніх пошкоджень, а й системних взаємозалежностей, які порушуються внаслідок катастроф. На його думку, ідентифікація рівня пошкоджень має ґрунтуватися на оцінці «вразливості функціональних вузлів» – транспортних мереж, енергетичних систем, комунікаційних структур [5].

Для кількісного визначення масштабу руйнувань використовується індекс пошкодження об'єкта, який узагальнює спектральні, геометричні та просторові показники. Модель індексу може бути подана у вигляді:

$$I_d = \alpha_1 \times |R_{до} - R_{після}| + \alpha_2 \times \frac{\Delta H}{H_0} + \alpha_3 \times \frac{S_d}{S_0}, \quad (1)$$

де $R_{до}$ та $R_{після}$ – показники спектрального відбиття об'єкта до та після руйнування, ΔH – зміна середньої висоти споруди за даними цифрової моделі рельєфу, S_d – площа пошкодженої поверхні, S_0 – початкова площа об'єкта, α_i – вагові коефіцієнти, що визначаються експертно [6].

Результати аналізу інтегруються у багатопланові геоінформаційні системи (ArcGIS, QGIS, ERDAS Imagine), де відбувається подальше моделювання

пошкоджень через метод зваженого накладання, описаний у працях Томаса Сааті (Thomas Saaty, 1980). Формула цього підходу має вигляд:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \times N_i(x, y), \quad (2)$$

де $R(x,y)$ – інтегральний показник ступеня пошкодження території, $N_i(x,y)$ – нормалізоване значення параметра кожного шару, w_i – коефіцієнт ваги фактора. Така інтеграція забезпечує можливість поєднання даних про матеріальні втрати з просторовими характеристиками системи, створюючи картографічну модель стійкості.

У таблиці 1 подано узагальнення сучасних методів картографічної ідентифікації пошкоджень, що застосовуються у міжнародній практиці.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика сучасних методів картографічної ідентифікації пошкоджень у системно-структурному аналізі

Метод	Суть підходу	Джерело даних	Середня точність	Переваги	Обмеження
Візуальна експертна інтерпретація	Аналіз супутникових знімків фахівцями	Sentinel-2, WorldView	70–80%	Простота, оперативність	Суб'єктивність
Об'єктно-орієнтований аналіз (OBIA)	Сегментація об'єктів та класифікація за морфологічними ознаками	Multispectra l imagery	85–90%	Висока деталізація	Потребує калібрування
Нейронні мережі (U-Net, CNN)	Автоматичне розпізнавання пошкоджень на основі глибокого навчання	SAR + Optical	92–97%	Самонавчання, масштабованість	Великі обчислювальні ресурси
Інтерферометричний SAR-аналіз	Вимірювання зсувів поверхні за радарними даними	Sentinel-1	80–88%	Незалежність від хмарності	Менша чутливість у щільній забудові
Гібридні ГІС-моделі	Інтеграція супутникових, кадастрових та польових даних	Комбіновані бази	90%+	Комплексність, системність	Висока обчислювальна складність

Джерело: (розроблено автором на основі [6])

Свою чергою, Омар Даріо Кардона запропонував концепцію оцінювання системної вразливості, яка полягає у визначенні частки збережених функціональних зв'язків у межах інфраструктурної мережі [6]:

$$S_f = \frac{L_{зб}}{L_{зар}} \times 100\%, \quad (3)$$

де $L_{зб}$ – кількість збережених зв'язків, $L_{заг}$ – початкова кількість. Цей підхід дозволяє враховувати не лише масштаб руйнувань, а й ступінь порушення просторової взаємодії між об'єктами.

Застосування таких моделей в Україні нині активно розвивається у межах ініціатив, пов'язаних із відбудовою територій, пошкоджених під час війни. Науковці використовують поєднання даних з європейських супутників Sentinel, аерофотозйомки, дронів та геоінформаційних систем, що дає можливість створювати карти руйнувань у режимі реального часу. Це не лише підвищує точність ідентифікації, а й сприяє стратегічному плануванню реконструкції інфраструктури.

Отже, сучасна картографічна ідентифікація у межах системно-структурного аналізу є складним міждисциплінарним процесом, що поєднує точні методи обробки даних із просторовим моделюванням. Вона забезпечує не лише об'єктивне визначення масштабу пошкоджень, а й створює передумови для науково обгрунтованого управління відновленням територій, орієнтованих на підвищення їхньої стійкості та адаптивності до майбутніх викликів.

Системно-структурний аналіз масштабу руйнувань передбачає поєднання просторових, інженерних і функціональних параметрів для визначення стійкості території після деструктивних подій. Одним із ключових його елементів є класифікація об'єктів за функціональним призначенням, оскільки саме функція визначає системну роль елемента та масштаб впливу його втрати на загальну життєздатність території [7].

У структурній моделі території житлові, промислові, транспортні та енергетичні об'єкти утворюють різні рівні просторової ієрархії. Згідно з концепцією Томаса Блашке (Thomas Blaschke), який досліджував просторові структури з використанням об'єктно-орієнтованого аналізу, кожен тип об'єктів виконує унікальну роль у системі, тому процес ідентифікації пошкоджень має враховувати як морфологічні, так і функціональні ознаки [8]. Класифікація за функціями дозволяє побудувати логічну модель територіальної взаємодії, де руйнування одного типу елементів може призвести до порушення функцій інших.

Високий рівень деталізації функціональних класів дає змогу створювати аналітичні моделі ризику та вразливості, що підкреслюється у працях Бісваджіта Прадхана (Biswajeet Pradhan), який розробив методи застосування геоінформаційних технологій і машинного навчання для класифікації об'єктів та моделювання впливу катастроф. Він вказує, що системна оцінка має базуватись на трьох критеріях: фізичному стані об'єктів, їхній функціональній ролі та ступені просторової інтегрованості у мережу території [9].

З позиції системного підходу, територія може бути змодельована як мережа взаємозалежних вузлів, де кожен клас об'єктів характеризується своєю стратегічною вагою W_i . Узагальнений індекс системної стійкості S_t визначається за формулою:

$$S_t = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times (1 - D_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (4)$$

де D_i – індекс пошкодження об'єкта, W_i – функціональна вага класу. Цей показник відображає, як втрата певних об'єктів знижує рівень стійкості системи.

Результати досліджень Діланті Амаратунги (Dilanthi Amaratunga) підтверджують, що найкритичнішими для системи є об'єкти з низькою

структурною еластичністю – тобто ті, що не мають функціональних аналогів або резервів [10]. До них належать енергетичні вузли, транспортні розв’язки, логістичні хаби. На відміну від житлових чи малих промислових об’єктів, їх руйнування створює каскадний ефект, що порушує функціонування цілої системи.

Щоб врахувати цей ефект, формується матриця функціональної взаємозалежності M_{ij} , де елементи показують, наскільки пошкодження об’єктів одного типу впливає на інші. Сукупний індекс системного пошкодження розраховується як:

$$D_s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \times D_i, \quad (5)$$

Така модель дозволяє простежити як прямі, так і опосередковані наслідки деструкції, що особливо важливо для урбанізованих систем із високою щільністю функціональних зв’язків.

Для більшої наочності та систематизації результатів проведеного аналізу доцільно представити функціональну класифікацію об’єктів у структурі територіальної системи. Таблиця 2 відображає взаємозв’язок між типом об’єктів, їх основною роллю, наслідками руйнувань та впливом на загальну системну стійкість [11]. Такий підхід дозволяє виокремити елементи, чия втрата є критичною для функціонування території, та визначити їхній пріоритет у процесі відновлення. Крім того, наведені коефіцієнти стратегічної ваги W_i відображають частку внеску кожного класу в загальну структуру системи, що є основою для подальшого кількісного моделювання системної стійкості.

Таблиця 2

Функціональні класи об’єктів і їхній вплив на стійкість територіальної системи

Тип об’єкта	Основна функція	Типові наслідки руйнування	Коефіцієнт стратегічної ваги (W_i)	Структурна еластичність
Житлові	Забезпечення проживання	Соціальні втрати, релокація населення	0.2	Висока
Промислові	Виробництво та переробка ресурсів	Втрата економічного потенціалу	0.3	Середня
Транспортні	Мобільність, логістика	Порушення постачання, комунікацій	0.25	Низька
Енергетичні	Енергопостачання, теплотабезпечення	Зупинка критичної інфраструктури	0.25	Дуже низька

Джерело: розроблено автором на основі [11]

Для візуального представлення впливу руйнувань різних функціональних об’єктів на загальну стійкість територіальної системи побудований рис. 2. Графічна інтерпретація дозволяє простежити нелінійний характер цієї залежності: зростання рівня пошкодження об’єктів енергетичної та транспортної інфраструктури спричиняє різке падіння системної стійкості, тоді як вплив руйнувань житлових або

промислових споруд є менш критичним [12]. Такий аналіз наочно демонструє, які типи об'єктів виконують ключові функції у збереженні функціональної цілісності території та повинні розглядатися як пріоритетні у процесі стабілізації й відновлення.

Класифікація об'єктів за функціональним призначенням є ключовим чинником у системно-структурному аналізі. Вона дозволяє не лише деталізувати ступінь пошкодження, а й моделювати просторові сценарії стійкості. Узагальнюючи підходи Блашке, Прадхана та Амаратунги, можна зробити висновок, що саме функціональна структура території визначає її здатність до відновлення – тобто потенційну резильєнтність у післякризових умовах.

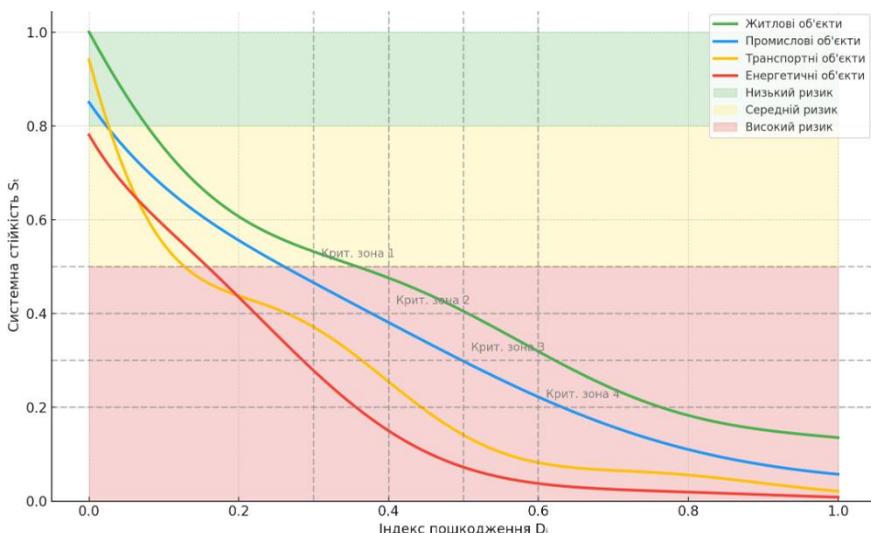


Рис. 2. Взаємозв'язок рівня пошкодження функціональних об'єктів та системної стійкості (розроблено автором на основі [12])

Урбанізована система є багаторівневою мережею, де кожен елемент виконує певну роль у підтриманні функціональної цілісності території. Взаємозв'язки між цими елементами – транспортними вузлами, промисловими підприємствами, енергетичними станціями, житловими масивами – формують складну систему потоків ресурсів, енергії та інформації. Коли внаслідок руйнувань ці зв'язки перериваються, система переходить у стан структурної дестабілізації. Саме тому в системно-структурному аналізі важливим завданням є кількісне визначення того, наскільки порушення просторово-функціональних зв'язків впливає на зниження цілісності урбанізованого середовища.

Для цього створюється топологічна модель, у якій об'єкти інфраструктури виступають вузлами графа $G(V,E)$, а зв'язки між ними – ребрами. Кожне ребро має вагу w_{ij} , що визначає інтенсивність функціональної взаємодії між вузлами i та j .

Після деструктивного впливу система переходить у новий стан $G'(V',E')$, де кількість вузлів і ребер зменшується, а ваги окремих зв'язків знижуються. Ступінь

втрати функціональної цілісності можна виразити через коефіцієнт збереження зв'язності:

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}}, \quad (6)$$

де A_{ij} – елемент матриці суміжності початкової системи (1 – зв'язок існує, 0 – відсутній), а A'_{ij} – елемент матриці після руйнувань. Цей коефіцієнт показує, яка частка функціональних зв'язків збереглася після впливу.

Однак така проста модель не враховує вагу зв'язків і їхню функціональну важливість. Для підвищення точності застосовується зважена топологічна модель функціональної стійкості, що визначається формулою:

$$W_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \times \delta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad (7)$$

де w_{ij} – коефіцієнт важливості зв'язку між об'єктами i і j , δ_{ij} – індикатор збереження зв'язку (1 – функціонує, 0 – втрачено).

Щоб урахувати не лише втрату прямих, але й опосередкованих зв'язків, уводиться матриця функціональної залежності M_{ij} , яка описує ступінь впливу одного елемента на інший через проміжні зв'язки. Тоді інтегральний коефіцієнт функціональної цілісності системи визначається як:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \times w_{ij} \times \delta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \times w_{ij}}, \quad (8)$$

Така формула відображає ієрархічну природу урбанізованої структури, де окремі зв'язки можуть мати підпорядковане значення, а деякі – критичне для функціонування всієї системи.

Для оцінки рівня деструктивного впливу доцільно визначити індекс втрати функціональної цілісності (ІФЦ):

$$I_{\text{ФЦ}} = 1 - F_s, \quad (9)$$

Цей показник має діапазон від 0 до 1, де 0 – система повністю зберегла функціональну структуру, а 1 – повна деструкція просторово-функціональних зв'язків.

Для ефективного виявлення ступеня порушення просторово-функціональних зв'язків в урбанізованій системі доцільно побудувати логічну послідовність дій, що відображає увесь процес аналізу – від збору вихідних даних до формування аналітичних висновків [13]. Рис. 3 є базовою моделлю для практичного застосування методики оцінки функціональної цілісності території.

Для кількісного узагальнення отриманих результатів аналізу доцільно подати їх у табличній формі, яка дозволяє співставити різні типи інфраструктурних зв'язків за рівнем втрат, вагомістю та впливом на загальну стійкість системи. Таблиця 3 демонструє, як зміни у стані енергетичних, транспортних, комунікаційних та водопостачальних підсистем впливають на інтегральний показник функціональної цілісності F_s і відповідно – на індекс втрати функціональної цілісності $I_{\text{ФЦ}}$. Вона дає змогу наочно оцінити, які саме елементи мають найбільше стратегічне значення для відновлення урбанізованої структури після деструктивних впливів [14].



Рис. 3. Системний аналіз просторово-функціональних порушень (розроблено автором на основі [13])

Таблиця 3

Приклад впливу порушення зв'язків між підсистемами урбанізованої структури

Тип зв'язку	Функція у системі	Втрачені зв'язки (%)	Коефіцієнт ваги w_{ij}	Зниження F_s (%)	Вплив на $I_{ФЦ}$
Енергетичний	Електро - та тепlopостачання	25	0.40	35	Високий
Транспортний	Логістичні та мобільні потоки	30	0.35	30	Високий
Комунікаційний	Інформаційні мережі	15	0.15	10	Середній
Водопостачання	Життєзабезпечення населення	20	0.10	8	Низький

Джерело: розроблено автором на основі [14]

У разі втрати понад 25% енергетичних і транспортних зв'язків функціональна цілісність системи зменшується більш ніж наполовину. Це пояснюється нелінійною природою урбаністичних мереж – навіть часткове руйнування центральних вузлів

може призвести до каскадного ефекту, коли відмова одного елемента провокує збої у суміжних підсистемах.

Математичне моделювання демонструє, що система, у якій значення $F_s < 0.6$, втрачає здатність до самовідновлення без зовнішнього втручання. При цьому чим вищий показник концентрації вагових коефіцієнтів у невеликій кількості зв'язків, тим більша системна вразливість – явище, яке в теорії складних мереж визначається як "структурна централізація".

Аналіз просторово-функціональних зв'язків дозволяє не лише зафіксувати фізичний масштаб руйнувань, але й кількісно оцінити втрату системної стійкості. У практичному сенсі ці розрахунки стають основою для визначення пріоритетів відновлення – перш за все відновлюються вузли з найбільшими ваговими коефіцієнтами, тобто ті, що забезпечують базову цілісність урбанізованої системи.

Системно-структурний аналіз масштабу руйнувань і просторово-функціональних характеристик пошкоджених об'єктів формується як комплексний науковий підхід, що поєднує методи просторової аналітики, математичного моделювання, картографічної ідентифікації та оцінювання функціональної стійкості територій. Його сутність полягає у дослідженні території як єдиної системи, де кожен елемент – від окремої споруди до цілої інфраструктурної підсистеми – виконує власну роль у підтриманні життєздатності простору. Руйнування в цьому контексті розглядаються не лише як фізичне пошкодження матеріальних структур, а як порушення балансу зв'язків, функцій і потоків, що забезпечують існування системи.

Розвиток сучасних технологій дистанційного зондування, штучного інтелекту та геоінформаційних систем надав можливість здійснювати просторову ідентифікацію пошкоджень з високою точністю. Супутникові знімки, радарні дані та польові спостереження об'єднуються у єдині багаторівневі бази, які дозволяють створювати інтегровані карти руйнувань і визначати ступінь деградації об'єктів за фізичними та морфологічними ознаками. Водночас системно-структурний підхід виходить за межі фіксації пошкоджень – він спрямований на аналіз взаємозалежностей, визначення критичних елементів, розрахунок індексів стійкості та прогнозування ефективності відновлення.

Функціональна класифікація об'єктів є важливою складовою аналітичного процесу, адже дозволяє визначити, які саме елементи мають стратегічне значення для життєдіяльності території. Житлові, промислові, транспортні й енергетичні структури відіграють різні ролі, а їхня втрата впливає на систему нерівномірно. Зокрема, пошкодження енергетичних вузлів або транспортних комунікацій має значно більший ефект для системної стабільності, ніж втрата окремих житлових будівель. Саме на цьому рівні формується поняття структурної еластичності – здатності системи компенсувати втрату окремих елементів без руйнування загальної цілісності [15].

Просторово-функціональні зв'язки між об'єктами утворюють основу для визначення рівня системної стійкості. Побудова топологічних моделей інфраструктури дозволяє відобразити її у вигляді мережі взаємодій, де вузли відповідають об'єктам, а ребра – функціональним відносинам між ними. Кількісні показники, такі як коефіцієнт збереження зв'язків, зважений коефіцієнт зв'язності або інтегральний показник функціональної цілісності, відображають глибину системних змін після руйнувань. Втрата навіть невеликої кількості ключових

зв'язків може призвести до каскадного ефекту, коли відмова одного елемента запукає послідовність збоїв у суміжних підсистемах.

Математичні моделі, що застосовуються в межах аналізу, дозволяють розраховувати узагальнені показники стійкості території. Вони враховують вагу кожного об'єкта в системі, його взаємозв'язки, рівень пошкодження та здатність до відновлення. Завдяки цьому можливо не лише оцінити поточний стан інфраструктури, а й побудувати сценарії її реконструкції. Виявлення критичних зон вразливості дає змогу визначити послідовність відновлювальних робіт – пріоритетно відновлюються ті об'єкти, які забезпечують найбільший внесок у відновлення загальної функціональної рівноваги.

У підсумку системно-структурний підхід формує основу для прийняття рішень у сфері управління відбудовою, плануванням стійких міст і запобіганням майбутнім ризикам. Його перевага полягає в поєднанні просторових, функціональних і соціально-економічних параметрів у єдину аналітичну модель. Такий підхід дозволяє не лише оцінити минулі руйнування, а й сформулювати прогноз майбутньої динаміки території з урахуванням її адаптивного потенціалу.

Отже, системно-структурний аналіз масштабу руйнувань і просторово-функціональних характеристик пошкоджених об'єктів є не просто інструментом фіксації втрат – це комплексна методологія, що дозволяє осмислити поведінку території як живої системи, визначити закономірності її деградації та відновлення, а також створити наукову основу для стійкого розвитку та реконструкції у посткризовий період.

Висновок. Проведений системно-структурний аналіз дозволяє сформулювати цілісне уявлення про характер та масштаби руйнувань, а також про їхній вплив на загальну функціональну стійкість територіальної системи. Вивчені підходи демонструють, що деструктивні процеси не можна розглядати ізольовано – пошкодження окремих об'єктів призводять до порушення взаємозалежностей у системі, що формує каскадні ефекти різної інтенсивності. Саме тому ключовим стає не лише визначення ступеня фізичної деструкції, а й оцінювання змін у топологічних структурах та функціональних зв'язках між інфраструктурними елементами.

Результати дослідження засвідчують, що найвразливішими є енергетичні та транспортні підсистеми, втрата яких призводить до різкого падіння функціональної цілісності території. Системи життєзабезпечення, комунікаційні та водопостачальні структури мають різний рівень еластичності, але їх пошкодження також істотно впливає на стабільність урбанізованої мережі. Математичні моделі, що наведені у матеріалі, демонструють важливість урахування вагових коефіцієнтів і стратегічної значущості кожного об'єкта. Аналіз також підкреслив взаємодію між просторовими характеристиками та функціональною структурою території. Просторовий розподіл руйнувань визначає не лише матеріальні втрати, а й зміну інтенсивності потоків ресурсів, що потребує точних картографічних моделей. Застосування методів ОБІА, машинного навчання, інтерферометричного аналізу та багат шарових ГІС-моделей дозволяє значно підвищити точність оцінки.

Особливе значення має моделювання функціональної цілісності, що враховує як прямі, так і опосередковані зв'язки між об'єктами. Побудовані матриці функціональної залежності та інтегральні показники стійкості дозволяють прогнозувати поведінку системи після деструктивних впливів та визначати критичні вузли, які потребують першочергового відновлення.

Список літератури:

1. Barnes J., Klinger R. Embedding projection for targeted cross-lingual sentiment: model comparisons and a real-world study. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2019, 66. P. 691-742. <https://doi.org/10.1613/jair.1.11561>
2. Blaschke T. Object-based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2010. Vol. 65, № 1. P. 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
3. Drăguț L., Blaschke T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*. 2006. Vol. 81, № 3-4. P. 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>
4. Pradhan B., Lee S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*. 2010. Vol. 60. P. 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0245-8>
5. Cardona O. D. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. 2004. P. 37–51. URL: https://www.desenredando.org/public/articulos/2003/nrcvrfhp/nrcvrfhp_ago-04-2003.pdf
6. Ho, C. Y., Adriano, B., Baier, G., Mas, E., Wiguna, S., Koch, M., & Koshimura, S. (2026). Integrating GAN-Generated SAR and Optical Imagery for Building Damage Mapping. *Remote Sensing*, 18(1), 134. <https://doi.org/10.3390/rs18010134>
7. Blaschke T., Servais M. The Quest for a Spatial ESG Framework for the Real Estate Sector. *Proceedings*, 2025, 131(1), 59. <https://doi.org/10.3390/proceedings2025131059>.
8. Pradhan B., Lee S., Dikshit Abhirup, Kim H. Spatial flood susceptibility mapping using an explainable artificial intelligence (XAI) model. *Geoscience Frontiers*, 2023, Volume 14, Issue 6, 101625. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101625>.
9. Rinaldi S.M., Peerenboom J.P., Kelly T.K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*. 2001. Vol. 21, № 6. P. 11–25. <http://dx.doi.org/10.1109/37.969131>
10. Oh E.H., Deshmukh A., Hastak M. Disaster impact analysis based on inter-relationship of critical infrastructure and associated industries: A winter flood disaster event. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 2010. 1. 25-49. DOI: 10.1108/17595901011026463
11. Wang S., Liu, H., Chen, X. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391. P. 3323-3335. DOI:10.1016/j.physa.2011.12.043
12. Ouyang, M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Vol. 121. P. 43–60. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.06.040>
13. Johansson J., Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2010. – Vol. 95, № 12. P. 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.06.010>
14. Єрменчук О.П. Основні підходи до організації захисту критичної інфраструктури в країнах Європи: досвід для України: монографія. Дніпро: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2018. 180 с. URL: <https://er.dduvs.edu.ua/bitstream/123456789/2371/1/МОНОГРАФІЄрменчук.pdf>

15. Рижаківа Г.М., Малихіна О.М., Рижаків Д.А., Локтіонова Я.Ф., Лугіна Т.С., Коваль Т.С. Ризик-менеджмент в системі управління інтеграційними процесами як складова модернізації економіки України. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 36. С. 113 – 119.

TimurKUZMIN

Systemic–structural analysis of the scale of destruction and the spatial–functional characteristics of damaged objects

The systemic–structural analysis of the scale of destruction and the spatial–functional characteristics of damaged objects is a comprehensive research approach aimed at thoroughly assessing destructive processes that arise as a result of military actions, natural disasters, or technological accidents. It is based on the integration of spatial, engineering–technical, and functional parameters, which makes it possible to reconstruct an accurate picture of transformations within a territorial system. At the core of the methodology lies the combination of geoinformation technologies, remote sensing of the Earth, mathematical modelling, and object-based image analysis, which ensure the identification of destruction based on spectral, morphological, and topological features.

The analytical process begins with the collection of spatial data: satellite imagery, aerial photography, and field inspections. The next stage involves classifying objects by the level of destruction and by functional groups, which allows the systemic role of each element to be determined and the consequences of its loss to be assessed. Special attention is given to analysing the functional significance of residential, industrial, transport, and energy-related structures, as these form the foundation of the urbanised system. Damage to objects of different types is evaluated through indices of recoverability, logistical importance, energy dependency, and systemic criticality.

The study examines approaches to assessing spatial–functional disruptions using topological models in which infrastructural objects are represented as graph nodes and their interconnections as weighted edges. The functional integrity of the system is determined through coefficients of connection preservation and integral indicators of functional stability, which make it possible to evaluate the depth of destructive impacts. To improve accuracy, models accounting for the loss of both direct and indirect links are applied. Systemic–structural analysis also includes the forecasting of cascade effects – situations in which the destruction of one element triggers a chain reaction of degradation in neighbouring subsystems. As a result, a comprehensive model is formed that enables the determination of recovery priorities, the evaluation of systemic vulnerability, and the identification of critical elements upon which territorial stability depends.

Keywords: destruction, spatial analysis, functional stability, GIS modelling, critical infrastructure, topological connections, damage index, recoverability.

Дата надходження статті: 05.12.2025

Дата прийняття статті: 12.01.2026