

## Просторово–структурний аналіз ступеня руйнувань і архітектурно–конструктивних характеристик культових об'єктів

**Предметом дослідження** є просторово–структурний аналіз ступеня руйнувань культових споруд у взаємозв'язку з їх архітектурно–конструктивними характеристиками. Особлива увага приділена системному вивченню морфології сакральних об'єктів, їх матеріальної структури, конструктивної організації та просторового положення в історико–культурному середовищі. Предметом виступає встановлення закономірностей між рівнем втрати автентичності, характером пошкоджень, типом конструктивної системи та антропогенними чи природними факторами впливу. Дослідження охоплює класифікацію руйнувань, оцінку їхнього впливу на структурну цілісність об'єкта, а також аналіз геопросторових закономірностей у розподілі пошкоджень.

До предметної області входить також визначення індексів просторової концентрації руйнувань, побудова класифікаційних моделей збереженості, аналіз чутливості культових споруд до горизонтальних навантажень, біологічної деградації, сейсмічних впливів та нерівномірних осідань фундаментів. Особлива роль належить концепції автентичності як системному критерію оцінки історичної цінності споруди. Предмет включає синтез архітектурно–конструктивного аналізу, матеріалознавчої діагностики, ГІС–методів та 3D–сканування для формування інтегрованої моделі визначення ступеня руйнувань і потенціалу реконструкції сакральних об'єктів.

**Метою статті** є розроблення методичного підходу до просторово–структурного аналізу ступеня руйнувань культових споруд із урахуванням їх архітектурно–конструктивних та історико–просторових характеристик. Стаття спрямована на створення цілісної аналітичної системи, яка поєднує морфологічні, конструктивні, просторові та матеріалознавчі параметри для визначення рівня втрати автентичності та потенціалу відновлення сакральних об'єктів. Метою також є обґрунтування критеріїв класифікації руйнувань, побудова інтегральних індексів просторової концентрації пошкоджень, а також формування підходів до оцінки реконструкційної придатності на основі поєднання збереженості, функціональності та технологічної інтеграції. Стаття має на меті створити наукову базу для прийняття обґрунтованих рішень щодо реставрації та збереження сакральної спадщини.

**Методологія проведення роботи** ґрунтується на інтеграції просторового, конструктивного та матеріалознавчого аналізу з використанням ГІС–технологій, 3D–сканування та розрахункових моделей стійкості. Насамперед здійснюється класифікація ступенів руйнувань на основі критеріїв втрати автентичності: поверхневі дефекти, деформації несучих елементів, порушення структурної стабільності та повна руйнація. Для кожного об'єкта визначається рівень збереження історичної субстанції. Другим етапом є просторовий аналіз. Використання геоінформаційних методів дозволяє картографувати пошкодження, формувати індекс просторової концентрації руйнувань  $I_c$ , що обчислюється як функція вагових коефіцієнтів ступеня пошкодження та площ зон їхнього впливу. Це дає змогу виділяти території з критичним рівнем деградації. Третій етап передбачає архітектурно–конструктивний аналіз. Використовуються моделі граничного стану  $g(R,S)=R-S$ , визначаються індекси надійності  $\beta$ , розраховуються горизонтальні розпори в склепінчастих системах, мембранні зусилля куполів, параметри осідання фундаментів відповідно до рівнянь Терцзагі. Для динамічних впливів застосовується модель одного осцилятора та визначається базове зсувне зусилля. Четвертий етап — інтегральна оцінка реконструкційної придатності. Вводиться показник  $Pr$  як зважена функція збереженості об'єкта, його функціональної придатності та можливості технологічного підсилення.

**Результати роботи.** У результаті проведеного дослідження сформовано комплексну систему просторово–структурного аналізу культових споруд, що дозволяє визначати закономірності руйнувань та оцінювати їх вплив на архітектурно–конструктивну стабільність об'єктів. Застосування класифікації рівнів втрати автентичності забезпечило можливість детально відобразити різноманітність форм пошкоджень — від поверхневих дефектів до критичних руйнувань. Виявлено, що ступінь ушкоджень безпосередньо залежить від типу конструктивної системи: кам'яні склепінчасті та цегляні купольні

споруди демонструють вищу стійкість, тоді як дерев'яні об'єкти виявляються більш вразливими до біологічної деградації. Просторовий аналіз дозволив встановити кластерний характер розподілу руйнувань: у містах пошкодження зосереджені навколо історичних ареалів та транспортних коридорів, у сільській місцевості — мають дисперсний тип і корелюють з природними чинниками. Розрахунок індексу Іс показав, що високі його значення відповідають зонам критичної втрати автентичності, які потребують першочергового втручання. Архітектурно-конструктивний аналіз підтвердив ефективність моделей оцінювання граничного стану, надійності та динамічної поведінки склепін і куполів. Параметри горизонтального розпору, мембранних зусиль і осідань фундаментів дозволили кількісно визначити чутливість об'єктів до зовнішніх навантажень. Інтегральний показник Pr забезпечив диференційовану оцінку реконструкційної придатності для різних типів культових споруд.

**Висновки.** Проведене дослідження доводить, що просторово-структурний аналіз є ефективним інструментом оцінювання ступеня руйнувань культових споруд та визначення їхнього потенціалу для подальшої реконструкції. Встановлено, що характер і масштаби пошкоджень є результатом взаємодії конструктивних параметрів, матеріальної структури, географічного розташування та історико-культурного контексту. Сакральні споруди демонструють різну чутливість до навантажень: кам'яні та цегляні системи зберігають стійкість навіть за значних впливів, тоді як дерев'яні чи комбіновані конструкції потребують додаткових заходів підсилення. Просторове моделювання виявило чіткі закономірності концентрації руйнувань, що дозволяє виділяти пріоритетні зони реставраційних втручань. Інтегральний індекс Іс став дієвим інструментом локалізації критичних ділянок. Архітектурно-конструктивний аналіз підтвердив, що ключовими є параметри горизонтальних розпорів, мембранних напружень і граничних станів фундаментів — саме вони визначають загальну стабільність культових об'єктів. Важливим результатом є формування інтегрального показника Pr, який поєднує архітектурні, функціональні та технологічні аспекти реконструкції. Це дозволяє групувати об'єкти за рівнем придатності до відновлення, створюючи наукову базу для оптимального розподілу ресурсів. Дослідження також підтвердило, що застосування ГІС, 3D-сканування та матеріалознавчої діагностики суттєво підвищує точність аналізу стану споруд.

**Ключові слова:** руйнування культових споруд, автентичність, конструктивна стійкість, індекс концентрації руйнувань, просторовий аналіз, ГІС-моделювання, реконструкційний потенціал, склепінчасті системи, фундаментна стабільність.

VALENTYN HYRYA

## **Spatial-structural analysis of the degree of damage and architectural-structural characteristics of religious buildings**

**The subject of the study** is the spatial-structural analysis of the degree of damage to religious buildings in relation to their architectural and structural characteristics. Special attention is devoted to the systematic examination of the morphology of sacred objects, their material structure, structural organization, and spatial position within the historical and cultural environment. The subject also includes identifying patterns between the level of authenticity loss, the nature of the damage, the type of structural system, and anthropogenic or natural factors of influence. The study covers the classification of damage, assessment of its impact on the structural integrity of the object, and the analysis of geospatial patterns in the distribution of damage.

**The subject area** also comprises determining indices of spatial concentration of damage, developing classification models of preservation, and examining the sensitivity of religious structures to horizontal loads, biological degradation, seismic influences, and differential foundation settlement. A special role is assigned to the concept of authenticity as a systemic criterion for assessing the historical value of the structure. The subject includes the synthesis of architectural-structural analysis, materials-science diagnostics, GIS methods, and 3D scanning to create an integrated model for determining the degree of damage and the reconstruction potential of sacred buildings.

**The purpose of the article** is to develop a methodological approach to the spatial-structural analysis of damage to religious buildings, taking into account their architectural-structural and

*historical–spatial characteristics. The article aims to create a comprehensive analytical system that integrates morphological, structural, spatial, and materials–science parameters to determine the level of authenticity loss and the restoration potential of sacred objects. Another objective is to substantiate classification criteria for damage, construct integral indices of spatial damage concentration, and form approaches to evaluating reconstruction suitability based on preservation, functionality, and technological integration. The aim of the article is to provide a scientific basis for informed decisions regarding the restoration and preservation of sacred heritage.*

**The research methodology** is based on the integration of spatial, structural, and materials–science analysis using GIS technologies, 3D scanning, and structural stability models. First, a classification of damage levels is carried out based on authenticity–loss criteria: surface defects, deformation of load–bearing elements, loss of structural stability, and complete destruction. For each object, the level of preservation of historical substance is determined. The second stage is spatial analysis. The use of geoinformation methods makes it possible to map damage and to construct the spatial concentration index  $I_c$ , calculated as a function of weighted coefficients of the degree of damage and the areas of their zones of influence. This allows the identification of territories with critical levels of degradation. The third stage involves architectural–structural analysis. Limit–state models  $g(R,S)=R-S$  are applied, reliability indices  $\beta$  are determined, horizontal thrust in vaulted systems, membrane forces in domes, and foundation settlement parameters according to Terzaghi's equations are calculated. For dynamic impacts, a single–degree–of–freedom oscillator model is used to determine the base shear force. The fourth stage is the integral assessment of reconstruction suitability. The indicator  $P_r$  is introduced as a weighted function of object preservation, functional suitability, and the feasibility of technological strengthening.

**Results of the study.** The study resulted in the formation of a comprehensive system for the spatial–structural analysis of religious buildings, enabling the identification of damage patterns and the assessment of their impact on the architectural–structural stability of objects. The application of the classification of authenticity–loss levels allowed detailed representation of the diversity of damage forms—from surface defects to critical destruction. It was found that the degree of damage directly depends on the type of structural system: stone vaulted and brick domed buildings demonstrate higher resistance, whereas wooden structures are more vulnerable to biological degradation. Spatial analysis revealed the clustered distribution of damage: in urban settings, deterioration is concentrated around historical areas and transport corridors, while in rural areas it has a dispersed pattern correlated with natural factors. The calculation of  $I_c$  showed that its high values correspond to zones of critical authenticity loss requiring priority intervention. Architectural–structural analysis confirmed the effectiveness of models for evaluating limit states, reliability, and the dynamic behavior of vaults and domes. Parameters of horizontal thrust, membrane forces, and foundation settlement allowed for quantification of the objects' sensitivity to external loads. The integral indicator  $P_r$  provided a differentiated assessment of reconstruction suitability for various types of religious buildings.

**Conclusions.** The study confirms that spatial–structural analysis is an effective tool for assessing the degree of damage to religious buildings and determining their potential for reconstruction. It was established that the character and scale of damage are the result of the interaction of structural parameters, material composition, geographic location, and historical–cultural context. Sacred structures show varying sensitivity to loads: stone and brick systems maintain stability even under significant impacts, whereas wooden or composite constructions require additional strengthening measures. Spatial modeling revealed clear patterns in the concentration of damage, enabling the identification of priority zones for restoration interventions. The integral index  $I_c$  proved to be an effective tool for localizing critical areas. Architectural–structural analysis confirmed that the key parameters—horizontal thrust, membrane stresses, and foundation limit states—determine the overall stability of religious structures. An important outcome is the formation of the integral indicator  $P_r$ , which combines structural, functional, and technological aspects of reconstruction. This makes it possible to group objects by their restoration suitability, thus creating a scientific basis for optimal resource allocation. The study also confirms that the use of GIS, 3D scanning, and materials–science diagnostics significantly enhances the accuracy of assessing the condition of structures.

**Keywords:** *destruction of religious buildings, authenticity, structural stability, damage concentration index, spatial analysis, GIS modelling, reconstruction potential, vaulted systems, foundation stability.*

**Постановка проблеми.** Проблематика оцінювання ступеня руйнувань культових споруд набуває особливої актуальності з огляду на інтенсивність воєнних пошкоджень, природних процесів деградації та накопичених конструктивних деформацій, що характерні для сакральних об'єктів різних історичних періодів. Культові споруди є складними архітектурно-конструктивними утвореннями, у яких поєднуються різноманітні матеріали, просторові схеми, моделі навантаження та історико-культурні шари. Це створює ситуацію, коли навіть незначні локальні дефекти можуть спричинити масштабні структурні зміни. Саме тому виникає потреба у системному аналізі, який враховує просторово-структурні, конструктивні, морфологічні та матеріальні особливості об'єктів.

Проблема ускладнюється тим, що сакральні споруди характеризуються значною варіативністю архітектурних планувань — від однефних дерев'яних храмів до багатоярусних кам'яних базилік та купольних систем. Кожен тип має власний механізм руйнувань, що залежить від геометрії, конструктивної жорсткості, пропорційності елементів і характеру розподілу навантажень. У реальних умовах руйнування можуть розвиватися нерівномірно, формуючи просторові осередки деградації, які без комплексної діагностики залишаються невиявленими. Сутність проблеми полягає у відсутності інтегрованої методики, здатної поєднати просторові дані, архітектурно-конструктивний аналіз та функціональні параметри об'єкта у єдину систему, що дозволяє визначити ступінь втрати автентичності та реконструкційний потенціал. Існуючі підходи часто фрагментарні: вони розглядають або матеріальний стан, або архітектурні особливості, або зовнішні чинники окремо. Це унеможлиблює формування повної картини руйнувань та обґрунтування послідовності реставраційних заходів. Отже, постає потреба у поглибленому просторово-структурному підході, що включає класифікацію руйнувань, аналіз їхнього впливу на конструктивну систему та формування індексів просторової концентрації пошкоджень.

**Аналіз досліджень і публікацій з проблеми.** Аналіз наявного матеріалу показує, що дослідження руйнувань культових споруд традиційно охоплює три основні напрями: вивчення конструктивних систем сакральної архітектури, моделю-

вання процесів руйнування та оцінювання автентичності й збереженості матеріальної структури. У наукових роботах підкреслюється, що культові споруди, як складні архітектурні об'єкти, поєднують особливості просторових форм, традиційних технологій зведення та унікальних конструктивних рішень, що визначають їхню поведінку під дією зовнішніх та внутрішніх навантажень.

Багато публікацій присвячено структурі склепінчастих і купольних систем, де просторові розпори, мембранні зусилля й геометричні деформації визначають механізми розвитку тріщин і осідань. Дослідники акцентують увагу на тому, що традиційні кам'яні й цегляні конструкції мають значну резервну міцність, однак у випадку порушення рівноваги вони схильні до прогресуючого руйнування. У працях з дерев'яної сакральної архітектури підкреслюється домінування біологічної деградації, втрати несучої здатності зрубів та високу чутливість до вологи.

Істотне місце у дослідженнях займає аналіз архітектурної автентичності. Встановлено, що рівень автентичності є не лише культурним, а й конструктивним критерієм: чим більше первісної структури збережено, тим точнішим є прогноз поведінки об'єкта та його здатність до реконструкції. У публікаціях описуються підходи до класифікації руйнувань за ступенем втрати автентичності, що має важливе значення для визначення пріоритетності реставраційних заходів.

**Виклад основного матеріалу.** Просторово-структурний аналіз ступеня руйнувань культових споруд є важливою складовою дослідження процесів реконструкції та збереження об'єктів сакральної спадщини. Його метою є визначення взаємозв'язку між морфологічними характеристиками будівель, їх конструктивними особливостями та рівнем пошкоджень, що виникли внаслідок зовнішніх впливів — воєнних дій, природних катастроф чи тривалої експлуатаційної деградації. Такий підхід дозволяє не лише оцінити масштаби втрат, а й встановити потенціал для реставраційного відновлення з урахуванням автентичності кожного об'єкта.

Аналіз пошкоджень культових споруд базується на визначенні ступеня втрати автентичності як ключового показника збереженості історичної та архітектурної цінності. Автентичність у цьому кон-

тексті трактується як сукупність ознак, що зберігають оригінальну форму, конструктивну логіку, матеріальну структуру та художньо-символічний зміст споруди. Втрата цих характеристик може проявлятися у різних формах — від незначних поверхневих дефектів, які не впливають на цілісність об'єкта, до критичних руйнувань, що призводять до повної втрати історичної субстанції. У ході дослідження виділяються чотири рівні пошкоджень: низький, помірний, високий і критичний. Перший рівень охоплює локальні тріщини, осипання тиньку, корозію металевих деталей; другий включає деформації несучих стін чи склепінь; третій характеризується значним порушенням структурної стабільності; четвертий означає повну руйнацію, коли відновлення можливе лише у формі репродукції [1].

У процесі аналізу встановлено, що ступінь пошкоджень безпосередньо пов'язаний із типом конструктивної системи споруди. Кам'яні храми з масивними склепінчастими перекриттями демонструють вищу опірність до горизонтальних навантажень, тоді як дерев'яні споруди частіше зазнають руйнувань через біологічне старіння матеріалу та динамічні впливи. Водночас технічний стан об'єктів значною мірою залежить від особливостей їхнього розташування у структурі населеного пункту: центральні культові будівлі, як правило, мають кращий стан завдяки регулярному догляду, тоді як периферійні об'єкти частіше опиняються в зоні високого ризику руйнувань.

Застосування просторових методів дослідження, зокрема геоінформаційного моделювання та тривимірного сканування, забезпечує можливість точного картографування рівнів втрати автентичності для кожного об'єкта сакральної архітектури. На основі отриманих даних формується узагальнена класифікаційна модель, що відображає співвідношення між ступенем пошкоджень і типом конструктивної системи. Така модель (рис. 1) створює аналітичну основу для подальшої розробки програм реставрації та консервації, орієнтованих на диференційований підхід до кожної категорії споруд.

Так, просторово-структурний аналіз ступеня руйнувань культових об'єктів є багаторівневим процесом, що поєднує морфологічну оцінку, картографічну візуалізацію та конструктивно-технічний аналіз. Його результати дають змогу не лише визначити масштаб пошкоджень, а й сформува-ти науково обґрунтовану стратегію збереження

сакральної спадщини у контексті історичної автентичності та архітектурної ідентичності територій.

Подальший етап просторово-структурного аналізу передбачає розширення методологічної бази дослідження шляхом інтеграції кількісних і якісних параметрів у єдину аналітичну модель. Важливо не лише виявити просторові закономірності руйнувань, а й зрозуміти, як саме вони відображають системну трансформацію сакрального середовища в умовах воєнних і поствоєнних процесів. У цьому контексті аналіз отриманих картографічних даних дозволяє сформулювати низку узагальнених висновків про територіальну організацію втрат, рівень ризику подальшої деградації та потенціал для ревіталізації пошкоджених об'єктів.

Зіставлення геоінформаційних даних з історико-культурними межами показує, що структура руйнувань має виражену кластерну морфологію, тобто більшість пошкоджень зосереджується у межах певних історичних ареалів або уздовж ліній транспортних і комунікаційних коридорів.

Така концентрація вказує на системну вразливість урбанізованих територій, де сакральні об'єкти розташовані в безпосередньому контакті із зонами високої антропогенної активності. У сільських ландшафтах, навпаки, характерним є дисперсний тип розподілу пошкоджень, який корелює з природними чинниками — рельєфом, гідрографічними структурами та станом ґрунтів.

Значущим у процесі дослідження є застосування індексного підходу до оцінки щільності руйнувань, коли кожному об'єкту надається ваговий коефіцієнт залежно від рівня втрати автентичності. Сукупність цих коефіцієнтів формує карту просторової інтенсивності втрат, де високі значення вказують на зони з критичним станом збереженості. Для кількісного вираження цього показника доцільно використовувати індекс просторової концентрації руйнувань:

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot A_i)}{A_t}, \quad (1)$$

Де  $I_c$  — інтегральний індекс концентрації руйнувань;  $W_i$  — ваговий коефіцієнт ступеня пошкодження  $i$ -го об'єкта;  $A_i$  — площа зони впливу об'єкта;  $A_t$  — загальна площа досліджуваної території.

Високе значення індексу  $I_c$  свідчить про локалізовану концентрацію руйнувань, що потребує пріоритетного втручання у межах реставраційних або стабілізаційних програм. Методика такого аналітичного підходу узгоджується з рекомендаціями Birra



**Рисунок 1. Класифікаційна схема рівнів втрати автентичності культових споруд залежно від характеру пошкоджень**

Джерело: розроблено автором на основі [2]

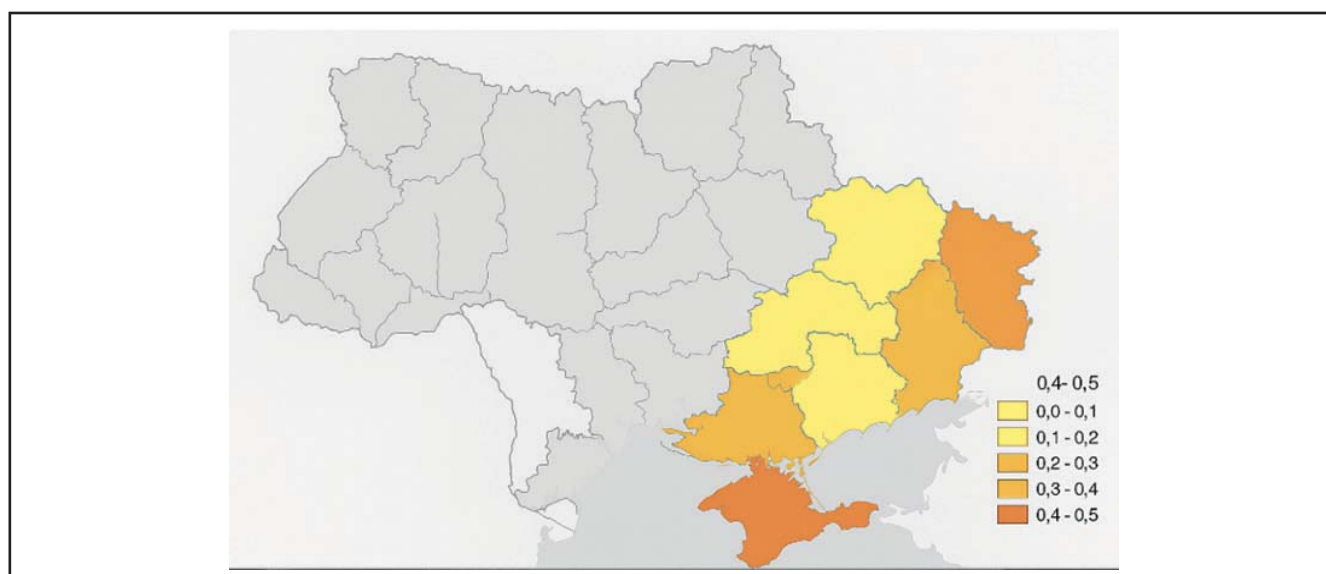
Charter щодо оцінки цілісності й автентичності історичних об'єктів (ICOMOS, 2013) та відповідає підходам, запропонованим Родвелом у дослідженні просторової стійкості історичних міст (Rodwell, 2007).

Особливої уваги заслуговує виявлена кореляція між історико-хронологічною стратифікацією сакральних об'єктів і рівнем їх руйнування. Стародавні храми, зведені до XIX ст., демонструють вищу стійкість завдяки використанню традиційних конструктивних систем і природних матеріалів, тоді як культові споруди пізнішого періоду, побудовані із застосуванням змішаних технологій або спрощених конструкцій, виявляють біль-

шу уразливість до механічних і термічних впливів [3]. Це свідчить про необхідність поєднання архітектурно-конструктивного аналізу з просторовими моделями для більш точного прогнозування потенціалу відновлення.

На рисунку 2 наведено узагальнену картографічну модель просторової концентрації зруйнованих сакральних споруд, побудовану на основі ГІС-аналізу, яка демонструє розподіл індексу Іс у межах регіонів різної щільності історико-культурних об'єктів.

Таким чином, просторово-структурний підхід переходить від констатації фактів руйнуван-



**Рисунок 2. Просторова карта концентрації зруйнованих культових споруд за рівнями втрати автентичності**

Джерело: розроблено автором на основі [3]

ня до аналітичного осмислення механізмів, що їх зумовили. Отримані результати дають змогу формувати науково виважені рекомендації щодо стратегічного планування реконструкцій, розподілу ресурсів та збереження історико-архітектурної ідентичності сакрального простору [4].

Архітектурно-конструктивні параметри культових споруд є визначальним чинником їх стійкості та довговічності, особливо в умовах воєнних, сейсмічних чи кліматичних деструкцій. Взаємодія просторової форми, матеріалу, типу перекриття й фундаментної системи створює комплексну систему рівноваги, у якій будь-яка локальна втрата міцності або геометричної стабільності здатна ініціювати прогресивні руйнування. Для сакральних об'єктів, що поєднують у собі історичну автентичність і унікальну конструктивну організацію, важливо не лише оцінити загальний рівень стійкості, а й кількісно виразити чутливість споруди до дії зовнішніх навантажень [5].

Надійність споруди можна описати за допомогою показника граничного стану  $g(R,S)=R-S$ , де  $R$  — несуча здатність, а  $S$  — діючі навантаження. Імовірність відмови визначається функцією:

$$P_f = \Phi(-\beta), \beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (2)$$

де  $\beta$  є індексом надійності, який відображає запас міцності конструкції. Для культових споруд із мурованими або кам'яними склепіннями прийнятним рівнем вважають  $\beta \geq 3.0$ , що забезпечує стабільну поведінку при сейсмічних і вібраційних діях.

Одним із критичних параметрів склепінчастих систем є горизонтальний розпір ННН, який оцінюють наближено:

$$H \approx \frac{ql^2}{8f}, \quad (3)$$

де  $q$  — рівномірне навантаження,  $l$  — проліт склепіння,  $f$  — підйом арки. Збільшення підйому  $f$  або застосування стискуючих поясів дозволяє зменшити горизонтальні зусилля та уникнути розкриття тріщин у підпружних арках. Для купольних споруд, де навантаження розподіляються мембранно, вирішальними є меридіональні ( $N_\phi$ ) і кільцеві ( $N_\theta$ ) зусилля, що визначаються з рівняння рівноваги оболонки:

$$\frac{dN_\phi}{d\phi} + (N_\phi - N_\theta) \cot \phi + pR = 0, \quad (4)$$

Якщо  $N_\theta > 0$ , тобто з'являються розтягувальні зони, купол потребує кільцювання — сталевими

або композитними FRP-поясами, що стабілізують оболонку без втручання у її зовнішню форму.

Для аналізу реакції конструкцій на динамічні впливи застосовується модель еквівалентного одновільного осцилятора (SDOF):

$$V_b = \Gamma_1 M_1 S_a(T_1, \xi), \quad (5)$$

де  $V_b$  — базове зсувне зусилля,  $M_1$  — модальна маса,  $S_a$  — спектральне прискорення, а  $\Gamma_1$  — коефіцієнт модальної участі. Цей показник відображає чутливість культових споруд до сейсмічних дій, особливо в зонах зі слабкою структурною зв'язністю між арками, колонами та куполом.

Важливу роль відіграє також стан фундаментів. Для оцінки граничного тиску ґрунту використовується рівняння Терццарі:

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma, \quad (6)$$

а консолідаційне осідання визначається як

$$s = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log_{10} \left( \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right), \quad (7)$$

де параметри  $C_c$  та  $e_0$  характеризують стисливість ґрунту, а  $\sigma'$  — ефективні напруження. Осідання фундаментів, особливо асиметричне, часто є головною причиною тріщиноутворення у вітарних частинах і купольних опорах.

Для оцінки ефективності конструктивного підсилення застосовується безрозмірний показник:

$$\eta = \frac{K_c^{після} - K_c^{до}}{K_c^{до}} \times 100\%, K_c = R_m Q_n \quad (8)$$

де  $\eta$  виражає приріст несучої здатності після виконання реставраційних заходів.

Узагальнені результати аналізу наведено у таблиці 1, яка демонструє вплив типу конструктивної системи, матеріалу й форми перекриття на параметри стійкості споруд [6]. Як ми побачимо з таблиці, найбільш стійкими виявляються залізобетонні й комбіновані системи, тоді як дерев'яні конструкції мають найменшу міцність, але водночас забезпечують найкраще енергопоглинання при сейсмічних впливах. Купольні та склепінчасті форми мають природну геометричну стабільність, однак потребують регулярного моніторингу кільцевих напружень та осідань фундаментів.

Підсилення сакральних споруд має здійснюватися за принципом структурної сумісності, коли нові елементи не порушують історичної тканини. Використання методів композитного армування, мінерального ін'єктування та внутрішнього кільцювання дозволяє підвищити індекс надійності  $\beta$  на 20–40 % без втрати автентичності об'єкта.

**Таблиця 1. Порівняльна характеристика конструктивних систем культових споруд за основними показниками стійкості**

Тип конструкції	Матеріал (середнє ЕЕЕ)	Геометрія (проліт/підйом)	Критичний параметр	Сейсм. навантаження VbV_bVb	Типове підсилення	Ефективність $\eta \setminus \eta_{\text{eta}}$ , %
Кам'яна склепінчаста	Камінь, вапняк (10–18 ГПа)	12–20 м / 0.2–0.3	Горизонтальний розпір ННН	Середній	Металеві тяги, ін'єктування	25–35
Цегляна купольна	Цегла (8–15 ГПа)	R = 6–12 м	Мембранні зусилля $N\theta N_\theta \setminus \theta$	Високий	Кільцювання FRP, діафрагми	35–55
Дерев'яна балкова	Дерево (9–12 ГПа)	8–14 м	Волога, повзучість	Невисокий	Заміну елементів, армування	20–40
Комбінована (камінь + бетон)	Змішана (15–25 ГПа)	10–16 м	Втрата жорсткості на стику	Високий	Залізобетонне сорочкування	40–60
Залізобетонна рамна	Бетон (25–30 ГПа)	6–10 м	Пластичність вузлів	Дуже високий	Монолітні зв'язки, затягування	50–70

Джерело: розроблено автором на основі [6]

Такий підхід поєднує інженерну точність і збереження духовної та історичної цілісності архітектурної спадщини.

Сакральні об'єкти у системі історичного середовища є не лише архітектурними домінантами, а й структурними ядрами просторової організації міських і сільських територій. Їхня присутність формує морфологію середовища, впливає на конфігурацію транспортних і соціальних зв'язків, визначає духовно-культурну ідентичність ландшафту. Архітектурно-просторова структура таких об'єктів завжди поєднує дві складові — морфологічну, яка визначає фізичну форму та геометрію ансамблю, і функціональну, що втілює його роль у соціокультурній системі громади [7].

Аналіз містобудівних систем різних історичних епох свідчить, що сакральні об'єкти виступають просторовими регуляторами забудови, задаючи напрямки розвитку поселень та осі композиційної рівноваги. У межах сучасних умов відновлення культурного середовища вони продовжують формувати моделі функціональної інтеграції, які дозволяють забезпечити стале співіснування історичних споруд із новими урбаністичними утвореннями. В результаті дослідження виділено три основні типи просторово-структурних моделей сакральних об'єктів (рис. 3): централізовану домінантну, осьову (лінійну) та периферійну (ландшафтну).

Такі моделі визначають не лише просторову роль сакральних будівель, але й рівень їх взаємодії з навколишньою забудовою, соціальною

інфраструктурою та ландшафтною структурою. У містобудівному контексті храм завжди функціонує як соціокультурний інваріант, що відновлює структурну гармонію території після деструктивних процесів — руйнувань, занепаду чи реконструкції. Відновлення сакрального об'єкта у своєму первісному місці часто має не лише архітектурний, але й соціальний ефект, повертаючи ціннісну ідентичність середовищу [9].

Перша модель — централізована — характерна для історичних міст із чіткою системою радіально-кільцевої забудови, де храм або монастир є містобудівним ядром і водночас символічним центром простору. Друга — лінійна — властива населеним пунктам, що формувалися вздовж транспортних осей або річкових долин, коли сакральні споруди вибудовували ритуально-комунікаційний ланцюг між поселеннями. Третя модель — периферійна — пов'язана з розміщенням культових споруд у природному середовищі, де архітектура храму взаємодіє з рельєфом, водними об'єктами чи лісовими масивами, утворюючи ландшафтно-сакральні композиції, які підсилюють духовно-просторове сприйняття середовища [8].

Оцінка потенціалу реконструкції пошкоджених культових споруд має ґрунтуватися на поєднанні структурно-функціональних і ціннісно-контекстуальних параметрів. Для цього використовується інтегральна модель, що враховує ступінь збереження автентичних елементів ( $\alpha$ ), функціональну придатність споруди до використання ( $\beta$ )

та можливість інтеграції сучасних технологій ( $\gamma$ ) без порушення історичного контексту [4]. Така модель дозволяє оцінити не лише фізичну придатність до відновлення, а й потенціал реінтеграції об'єкта у соціальне середовище.

Інтегральний показник реконструкційного потенціалу визначається як:

$$P_r = \frac{w_1\alpha + w_2\beta + w_3\gamma}{w_1 + w_2 + w_3}, \quad (9)$$

де  $w_1, w_2, w_3$  — вагові коефіцієнти, що задають пріоритетність критеріїв у конкретному контексті.

Отримане значення  $P_r$  у діапазоні 0–1 дозволяє диференціювати об'єкти за рівнем доцільності реконструкції:

$P_r > 0.75$  — висока реконструкційна придатність із можливістю повного функціонального відновлення;

$0.5 < P_r \leq 0.75$  — часткове збереження з елементами адаптації;

$P_r \leq 0.5$  — низький потенціал відновлення, що вимагає концептуального переосмислення форми або функції.

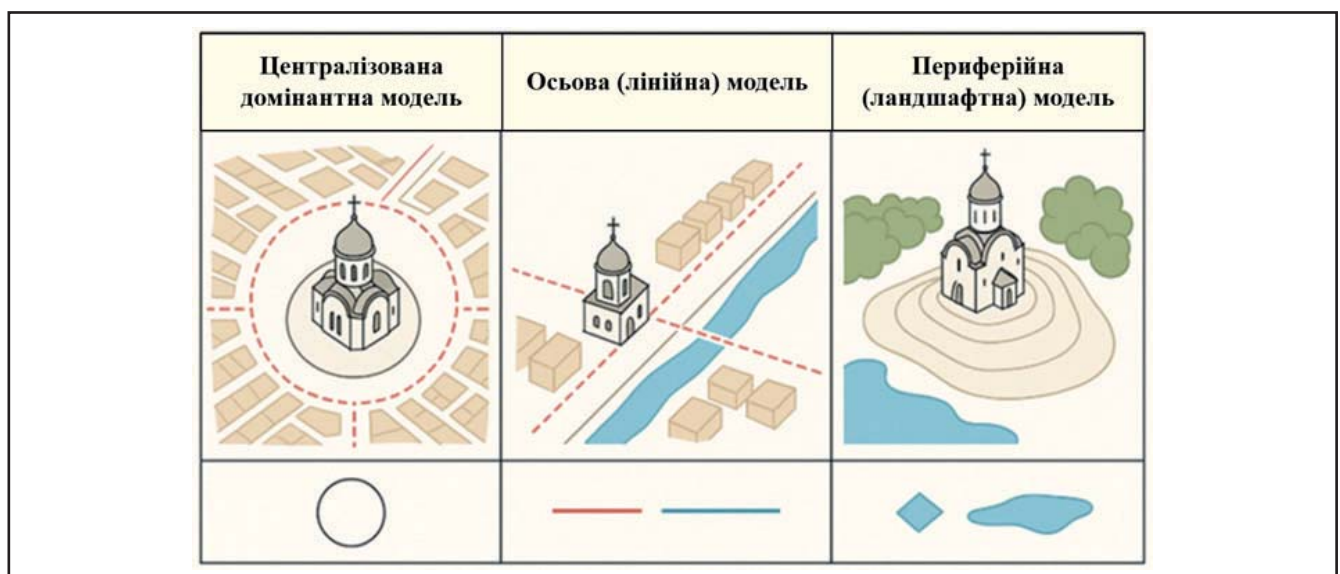
Для практичної оцінки застосовується матриця структурно-функціональної придатності, яка поєднує архітектурно-конструктивні, соціокультурні та технологічні аспекти. У її межах кожен об'єкт отримує кількісну оцінку, яка в подальшому може бути відображена у картографічному або візуальному форматі (рис. 4).

Поєднання просторово-структурного моделювання з аналітичними методами ГІС, 3D-скану-

вання та матеріалознавчої діагностики дозволяє створити об'єктивну систему рішень щодо пріоритетності реконструкції сакральних об'єктів. Як зазначають Letellier (2007), Bandarin & van Oers (2012) та Remondino & Campana (2014), ефективно відновлення можливе лише тоді, коли реставраційний процес враховує не лише технічні аспекти, але й культурно-просторову роль об'єкта у структурі території [10].

Отже, просторово-структурні моделі культових споруд у поєднанні з методами оцінки реконструкційного потенціалу формують науково обґрунтовану основу для відновлення духовного й архітектурного балансу історичного середовища, забезпечуючи сталість його розвитку без втрати автентичності та ідентичності.

Поєднання просторово-структурного моделювання з аналітичними методами ГІС, 3D-сканування та матеріалознавчої діагностики формує багаторівневу систему, що дозволяє оцінити не лише поточний стан сакральних споруд, але й визначити їхню потенційну спроможність до подальшої реконструкції. У цьому контексті важливо не лише виявити характер руйнувань, а й дослідити структурну поведінку об'єкта у контексті історичного середовища, що дає можливість встановити рівень відповідності майбутніх реставраційних рішень автентичній просторово-композиційній структурі території. Методи інтероперабельного просторового аналізу дозволяють поєднати морфологічні параметри спо-



**Рисунок 3. Просторово-структурні моделі розміщення сакральних споруд у міському та сільському середовищі**

Джерело: розроблено автором на основі [8]



**Рисунок 4. Модель оцінки реконструкційного потенціалу культових споруд за критеріями збереження, функціональності та технологічної інтеграції**

Джерело: розроблено автором на основі [10]

руди з її функціональними ролями в середовищі, а результати цифрової діагностики — застосувати об’єктивні критерії оцінки ризиків та реконструкційного потенціалу.

Комплексне оцінювання сакральних об’єктів, яке інтегрує дані ПС-моделювання, хмар точок 3D-сканування та результати матеріалознавчих досліджень, дає можливість структурувати об’єкти за їх пріоритетністю відновлення. Такий підхід забезпечує прозорість і наукову вваженість реставраційних рішень, які ґрунтують-

ся на реальній структурній спроможності об’єкта повернути свою роль у розвитку історичного середовища. Застосування багатofакторного аналізу також дозволяє визначити, наскільки реконструкція конкретної споруди сприятиме збереженню морфологічної ідентичності території, відновленню соціально-культурних зв’язків та просторовій гармонізації середовища.

Для демонстрації підходу до узагальнення результатів комплексної оцінки доцільно використати матрицю структурних та контекстуальних

**Таблиця 2. Матриця комплексної оцінки пріоритетності реконструкції сакральних споруд за структурними, середовищними та технологічними критеріями**

Група параметрів	Оціночний критерій	Зміст показника	Вплив на пріоритет реконструкції
Архітектурно-конструктивні	Ступінь структурної цілісності	Збереження стін, склепінь, фундаментів, куполів	Високий
	Рівень матеріальної автентичності	Частка автентичних матеріалів у конструкціях	Високий
Середовищні	Морфологічна роль у структурі середовища	Значення споруди як просторової домінанти	Середній-високий
	Інтегрованість у ландшафт	Взаємодія з природними елементами (рельєф, вода)	Середній
Функціонально-соціальні	Соціокультурна значущість	Роль у локальній ідентичності, духовна функція	Високий
	Потенціал сучасного використання	Можливість адаптації до актуальних потреб	Середній
Технологічні	Відповідність сучасним технологіям підсилення	Сумісність конструкцій з методами FRP, ін’єктування, 3D-моделювання	Високий
	Рівень ризиків при втручанні	Ймовірність пошкодження автентичної структури	Низький-середній

Джерело: розроблено автором на основі [10]

характеристик сакральних об'єктів, що дозволяє оцінити рівень впливу кожного з факторів на пріоритетність реконструкції (табл. 2). У цій матриці архітектурні, конструктивні, середовищні та технологічні параметри співставляються між собою з урахуванням їх вагомості у загальній системі відновлення — що забезпечує можливість формування обґрунтованих стратегій для подальших реставраційних рішень.

Такий підхід підтверджує, що наукове обґрунтування пріоритетності реконструкції повинно включати не лише оцінку технічного стану будівлі, а й аналіз її історико-просторової ролі, ступеня культурної цінності та її здатності забезпечити відновлення автентичного середовища [10].

Саме поєднання архітектурних, середовищних та технологічних критеріїв у рамках комплексної аналітичної моделі дозволяє сформуванню стратегію відновлення, яка забезпечує не лише фізичне відтворення сакральної споруди, а й логічне повернення її ролі в структурі історичного середовища.

### Висновок

Проведене дослідження дозволило сформуванню комплексний науковий підхід до аналізу ступеня руйнувань культових споруд з урахуванням їхніх архітектурно-конструктивних, просторових та матеріальних особливостей. Встановлено, що сакральні об'єкти є складними історико-архітектурними системами, де характер пошкоджень визначається поєднанням геометричних параметрів, типології конструкцій, фізико-механічних властивостей матеріалів та дії зовнішніх чинників. Це доводить необхідність відходу від фрагментарних методів оцінювання та переходу до багатопараметричних діагностичних моделей. Дослідження показало, що просторовий розподіл руйнувань не є випадковим: він формується під впливом конфігурації плану, архітектурної морфології, топографічних умов та спрямованості зовнішніх впливів. Використання індексу просторової концентрації Іс дозволило кількісно визначити осередки критичної деградації, що мають вирішальне значення для прогнозування подальших руйнувань та формування пріоритетності реставраційних робіт.

Аналіз конструктивних характеристик засвідчив, що ступінь пошкоджень суттєво залежить від типу несучої системи: кам'яні та цегляні склепінчасті структури, попри вищу стійкість, демонструють чутливість до деформацій основи та

горизонтальних навантажень, тоді як дерев'яні об'єкти — до вологості та біологічного впливу. Моделі граничного стану, мембранних зусиль і осідань фундаментів дозволили кількісно визначити критичні параметри, що обмежують реконструкційну придатність.

Важливим результатом є обґрунтування ролі автентичності як інтегрального критерію конструктивної й культурної цілісності споруди. Втрата автентичних елементів не лише знижує історичну цінність об'єкта, а й ускладнює прогнозування його поведінки та зменшує потенціал безпечного відновлення. Таким чином, збереженість первісної структури визначає ступінь реконструкційної доцільності.

У підсумку можна стверджувати, що використання просторово-структурного аналізу відкриває можливості для формування ефективних сценаріїв збереження сакральної спадщини, оптимізації розподілу реставраційних ресурсів та мінімізації втрат архітектурної автентичності. Запропонований підхід забезпечує науково обґрунтовану базу для ухвалення управлінських рішень щодо відбудови культових споруд у сучасних умовах підвищених ризиків та постконфліктних трансформацій.

### Список використаних джерел:

1. ICOMOS. The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance. — Australia ICOMOS Incorporated, 2013. — 16 p.
2. Rodwell, D. Conservation and Sustainability in Historic Cities. — Oxford: Blackwell Publishing, 2007. — 400 p. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://surl.li/sgulkd>
3. Letellier, R. Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Guiding Principles. — Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2007. — 192 p. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://surl.li/dkvvrb>
4. Remote Sensing and Disaster Risk Management for Cultural Heritage / L. Rayne, B. Rouhani, J. Lavris Makovics (ed.). — London & New York: Routledge, 2023. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003263647-7/remote-sensing-disaster-risk-management-cultural-heritage>
5. Milani, G., & Valente, M. Seismic Assessment of Masonry Churches: Numerical Modelling, Damage Scenarios, and Strengthening Strategies. — Engineering

Structures, 2019, Vol. 192, pp. 262–284. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.057

6. Borri, A., & Corradi, M. Seismic Vulnerability and Strengthening of Historic Masonry Buildings. – WIT Transactions on the Built Environment, Vol. 118, 2011. – P. 93–105. – DOI: 10.2495/STR110081

7. UNESCO. Managing Disaster Risks for World Heritage. – Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2010. – 125 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://whc.unesco.org/en/disaster-risk-management/>

8. Bandarin, F., & van Oers, R. The Historic Urban Landscape: Managing Heritage in an Urban Century. – Chichester: Wiley–Blackwell, 2012. – 376 p. – ISBN 978–0470655740.

9. Letellier, R. Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Guiding Principles. – Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2007. – 192 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/duacob>

10. Remondino, F., & Campana, S. (Eds.). 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices. – Oxford: Archaeopress, 2014. – 250 p. – ISBN 978–1784910263.

#### References:

1. ICOMOS. The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance. – Australia ICOMOS Incorporated, 2013. – 16 p.

2. Rodwell, D. Conservation and Sustainability in Historic Cities. – Oxford: Blackwell Publishing, 2007. – 400 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/sgulkd>

3. Letellier, R. Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Guiding Principles. – Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2007. – 192 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/dkvvrb>

4. Remote Sensing and Disaster Risk Management for Cultural Heritage / L. Rayne, B. Rouhani, J. Lavris Makovics (ed.). – London & New York: Routledge, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003263647-7/remote-sensing-disaster-risk-management-cultural-heritage>

5. Milani, G., & Valente, M. Seismic Assessment of Masonry Churches: Numerical Modelling, Damage Scenarios, and Strengthening Strategies. – Engineering Structures, 2019, Vol. 192, pp. 262–284. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.057

6. Borri, A., & Corradi, M. Seismic Vulnerability and Strengthening of Historic Masonry Buildings. – WIT Transactions on the Built Environment, Vol. 118, 2011. – P. 93–105. – DOI: 10.2495/STR110081

7. UNESCO. Managing Disaster Risks for World Heritage. – Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2010. – 125 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://whc.unesco.org/en/disaster-risk-management/>

8. Bandarin, F., & van Oers, R. The Historic Urban Landscape: Managing Heritage in an Urban Century. – Chichester: Wiley–Blackwell, 2012. – 376 p. – ISBN 978–0470655740.

9. Letellier, R. Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places: Guiding Principles. – Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2007. – 192 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/duacob>

10. Remondino, F., & Campana, S. (Eds.). 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices. – Oxford: Archaeopress, 2014. – 250 p. – ISBN 978–1784910263.

#### Дані про автора

**Гиря Валентин Миколайович,**

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6288-5325>

email: [allukraine2024@gmail.com](mailto:allukraine2024@gmail.com)

#### Data about the author

**Valentyn Hurya,**

Postgraduate student, Kyiv National University of construction and architecture

email: [allukraine2024@gmail.com](mailto:allukraine2024@gmail.com)

*Надходження статті до редакції 17.12.2025*

*Прийнято до друку 23.12.2025*

*Опубліковано 30.12.2025*