

DOI https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2026-6-4
УДК 72:004.8:004.946
ORCID ID: 0000-0002-8470-7956
ORCID ID: 0000-0003-0936-0494

Наталія Вергунова
кандидатка мистецтвознавства, доцентка,
завідувачка кафедри дизайну та 3D-моделювання
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
natalia.vergunova@kname.edu.ua

Марія Блінова
докторка архітектури,
професорка кафедри інноваційних технологій
у дизайні архітектурного середовища
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
mariia.blinova@kname.edu.ua

МЕТОДОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ІМЕРСИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КУЛЬТУРНО-КОНТЕКСТНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ АРХІТЕКТУРНОГО СЕРЕДОВИЩА

Анотація. ***Метою дослідження*** є теоретичне обґрунтування та розроблення структурованої типології методологічних режимів застосування штучного інтелекту й імерсивних технологій у культурно-контекстному дослідженні архітектурного середовища. ***Методи дослідження*** ґрунтуються на логічній аргументації, цілеспрямованому концептуальному синтезі та порівняльному аналізі наукових й інституційних джерел з питань архітектурної методології, цифрової спадщини, геопросторового аналізу, міських цифрових двійників, партисипативних практик та імерсивного дослідження сприйняття. Джерела зіставлено за домінантним дослідницьким питанням, типом вихідного матеріалу, дослідницькими стратегіями, функціями цифрових технологій, процедурами фахової інтерпретації, формою результату та межами його обґрунтованості. ***Основні результати.*** За результатами дослідження обґрунтовано поняття методологічного режиму як конфігурації проміжного рівня між загальною архітектурною методологією та конкретними дослідницькими процедурами. Виокремлено чотири базові режими: історико-інтерпретативний, просторово-аналітичний, соціокультурно-комунікативний і симуляційно-перцептивний. Для порівняння різнорідних результатів запропоновано рівень їхньої інтеграції та узагальнення, що дає змогу виявити взаємне підтвердження, доповнення або суперечності між різними типами свідчень. Встановлено, що однакові функції штучного інтелекту та імерсивних технологій можуть набувати різного методологічного й доказового статусу залежно від дослідницького питання, матеріалів і процедури перевірки. ***Висновки.*** Запропонована типологія дає змогу перейти від опису цифрових інструментів до визначення способів формування архітектурного знання. Вона може використовуватися для побудови структури дослідження, добору процедур, розмежування типів свідчень і документування меж обґрунтованого висновку, тоді як визначення культурної значущості, пріоритетів і допустимих компромісів залишається сферою професійного архітектурного судження.

Ключові слова: штучний інтелект, імерсивні технології, архітектурне середовище, методологічний режим, культурний контекст, архітектурне дослідження, фахова інтерпретація.

Nataliia Vergunova
PhD in Art Studies, Associate Professor,
Head of the Department of Design and 3D-modelling department
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
natalia.vergunova@kname.edu.ua

Maria Blinova
Doctor of Architecture,
Professor at the Department of Innovative Technologies in Architectural Environment Design
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
mariia.blinova@kname.edu.ua

METHODOLOGICAL REGIMES FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND IMMERSIVE TECHNOLOGIES IN CULTURE- AND CONTEXT-SENSITIVE RESEARCH ON THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT

Abstract. ***The aim of the study*** is to provide a theoretical foundation for and develop a structured typology of methodological regimes for the application of artificial intelligence and immersive technologies in culture- and context-sensitive research on the architectural environment. ***The research methods*** comprise logical argumentation, purposive conceptual synthesis, and comparative analysis of scholarly and institutional sources addressing architectural research methodology, digital heritage, geospatial analysis, urban digital twins, participatory practices, and immersive studies of spatial perception. The sources were compared according to the dominant research question, type of source material, research strategies, functions of digital technologies, procedures of professional interpretation, form of the result, and limits of its substantiation. ***Research Results***. The results of the study provide a conceptual foundation for the methodological regime as an intermediate-level configuration situated between general architectural methodology and specific research procedures. Four basic regimes were identified: historical-interpretative, spatial-analytical, sociocultural-communicative, and simulation-perceptual. A level for integrating and consolidating heterogeneous results was proposed to identify mutual confirmation, complementarity, or contradiction among different types of evidence. The study establishes that identical functions of artificial intelligence and immersive technologies may acquire different methodological and evidentiary statuses depending on the research question, source materials, and verification procedure. ***Conclusions.*** The proposed typology shifts the analysis of digital technologies from the description of tools towards the identification of ways in which architectural knowledge is produced. It can be used to structure research, select appropriate procedures, distinguish between types of evidence, and document the limits of substantiated conclusions. At the same time, determining cultural significance, priorities, and acceptable compromises remains within the domain of professional architectural judgement.

Key words: artificial intelligence, immersive technologies, architectural environment, methodological regime, cultural context, architectural research, professional interpretation.

Постановка проблеми та актуальність теми. В сучасних дослідженнях архітектурного середовища активно розкриваються можливості штучного інтелекту (Artificial intelligence, AI) і технології розширеної реальності (Extended reality, XR). Алгоритмічні системи підтримують пошук і класифікацію матеріалів, просторовий аналіз, прогнозування та генерування альтернатив [1]. Імерсивні технології застосовують для реконструкції й представлення культурної спадщини [2; 3], інтеграції та візуалізації просторових даних [4], а також дослідження сприйняття середовища [5]. Таким чином, цифрові засоби виконують як репрезентаційні, так і дослідницькі функції.

Характер отриманого знання формують дослідницьке питання, вихідні матеріали та процедура інтерпретації. Імерсивна модель може представляти історичну гіпотезу, аналітичні дані, сценарії для обговорення або умови дослідження навігації. Технології розпізнавання зображень дають змогу аналізувати архівні матеріали й сучасну забудову, а також опрацьовувати візуальні дані, отримані під час дослідження поведінки та думок користувачів. У кожному випадку методологічний статус результату визначається функцією цифрової операції та способом її фахової перевірки.

Особливого значення це розмежування набуває в культурно-контекстному дослідженні архітектурного середовища. Культурний контекст охоплює спадщину, історичну пам'ять, локальні знання, повсякденні практики, ідентичність місця, участь, інклюзію [6; 7]. Картографічні, статистичні й візуальні дані відображають структуровані характеристики середовища, а пам'ять, локальні значення та досвід використання простору потребують джерелознавчого аналізу, якісної інтерпретації й взаємодії з носіями локального досвіду.

Поєднання різних процедур потребує чіткого визначення доказового статусу результатів. Цифрова реконструкція може набути вигляду історично підтвердженого стану за відсутності достатніх джерельних підстав [2; 3]; просторова закономірність може бути помилково витлумачена як пояснення культурного значення [4]; технічна інтерактивність може створювати лише формальну видимість участі, тоді як відчуття присутності у віртуальному середовищі може переноситися на майбутній фізичний простір лише за певних умов [5]. Це зумовлює потребу в методологічній системі проміжного рівня, яка пов'язує дослідницьке питання, тип знання, архітектурну стратегію, функції цифрових технологій, фахову інтерпретацію та межі обґрунтованості результату. Така система має розмежовувати цифровий результат і сформоване на його основі архітектурне знання, а також визначати критерії аргументованого висновку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методологічну основу дослідження становлять праці, у яких дослідницьке питання співвідноситься зі стратегією та типом свідчень. Л. Гроут (L. Groat) і Д. Ванг (D. Wang) у праці «Architectural Research Methods» систематизують історичну, якісну, кореляційну, експериментальну й симуляційну стратегії, дослідження окремого випадку, логічну аргументацію та їхнє поєднання [8]. Й. Джабарін (Y. Jabareen) у статті «Building a Conceptual Framework: Philosophy, Definitions, and Procedure» визначає концептуальну рамку як результат виявлення, зіставлення та синтезу взаємопов'язаних понять [9]. Ці підходи дають змогу розглядати штучний інтелект та імерсивні технології як складники цілісної структури архітектурного дослідження.

Дослідження штучного інтелекту в архітектурі охоплюють генерування, оптимізацію, класифікацію, прогнозування та підтримку проєктних рішень. М. Л. Кастро Пена (M. L. Castro Pena) та співавтори у статті «Artificial Intelligence Applied to Conceptual Design: A Review of Its Use in Architecture» простежують перехід від автоматизації окремих операцій до алгоритмічної підтримки концептуального проєктування [1]. Людиноцентричний підхід у праці Б. Шнайдермана (B. Shneiderman) «Human-Centered Artificial Intelligence: Reliable, Safe & Trustworthy» поєднує автоматизацію зі збереженням людського контролю, творчої самостійності та відповідальності [10]. І. Кампо-Руїс (I. Campo-Ruiz) у статті «Artificial Intelligence May Affect Diversity: Architecture and Cultural Context Reflected through ChatGPT, Midjourney, and Google Maps» виявляє звужене й комерціалізоване представлення культурного контексту генеративними системами, що обмежує відображення культурного різноманіття [11]. Тому застосування алгоритмічних процедур потребує перевірки якості даних, урахування культурного контексту та фахової інтерпретації.

Дослідження цифрової спадщини зосереджені на документуванні, історичній реконструкції та представленні культурно значущих об'єктів. У колективній праці «A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage» систематизують застосування доповненої, віртуальної та змішаної реальності у роботі зі спадщиною [2]. У дослідженні «A Bibliometric Insight into Immersive Technologies for Cultural Heritage Preservation» автори розглядають точність, автентичність, культурну чутливість і збереження цифрових представлень [3]. У праці М. Сакаї (M. Sakai) та співавторів «AI-Accelerated Nazca Survey Nearly Doubles the Number of Known Figurative Geoglyphs and Sheds Light on Their Purpose» результати алгоритмічного виявлення геогліфів Наска перевірено експертним оцінюванням і польовим обстеженням [12]. Ці роботи засвідчують необхідність розмежування документованих свідчень, реконструктивних гіпотез і генеративних доповнень.

У роботі «Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany» розглядається цифрова модель Герренберга, яка поєднує просторовий аналіз, дані мобільності, симуляції, якісні матеріали та віртуальну реальність [4]. С. Маццетто (S. Mazzetto) у праці «A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development» [13] та Б. Кетцлер (B. Ketzler) зі співавторами у статті «Digital Twins for Cities: A State of the Art Review» [14] розглядають цифрові двійники як середовища інтеграції даних, моделювання, прогнозування та підтримки рішень. У публікації «A Perception-Powered Urban Digital Twin to Support Human-Centered Urban Planning and Sustainable City Development» автори доповнюють таку модель даними користувацького сприйняття [15], а С. Мороні (S. Moroni) у статті «Insurmountable Limitations of City-Scale Digital Twins? On Urban Knowledge and Planning» розкриває межі цифрового представлення складних міських систем і локального знання [16].

Цифрова участь і партисипативне проєктування утворюють окремий напрям застосування імерсивних технологій. Автори дослідження «Digital Participation in Urban Design and Planning: Addressing Data Translation Challenges in Urban Policy- and Decision-Making through Visualization Techniques» аналізують перетворення коментарів і картографічних позначок на матеріали професійного планування [17]. У статті «Urban Design and Planning Participation in the Digital Age: Lessons from an Experimental Online Platform» виявлено ризик формальної участі за обмеженого впливу користувачів на ухвалення рішень [18]. У праці А. Сімонофскі (A. Simonofski) та співавторів «Extended Reality for Citizen Participation: A Conceptual Framework, Systematic Review and Research Agenda» результативність участі пов'язано з рівнем залучення, характеристиками учасників, технологічними засобами та інституційним контекстом [19]. Імерсивне обговорення в архітектурній студії розглядають співавтори статті «Integrating Extended Reality in Architectural Design Studio Teaching and Reviews» [20], а в дослідженні «Intergenerational Cooperation and Co-Creation in Public Space Design Assisted by Virtual Reality Environments» науковці аналізують міжпоколінне співпроєктування громадського простору [21]. Ці роботи підкреслюють значення репрезентативності, доступності, етичної модерації та реального впливу учасників.

Інший напрям становлять дослідження сприйняття й поведінкових реакцій в імерсивно змодельованому середовищі. С. Ф. Куліга (S. F. Kuliga) та співавтори у праці «Virtual Reality as an Empirical Research Tool: Exploring User Experience in a Real Building and a Corresponding Virtual Model» зіставляють досвід користувачів у реальній будівлі та її віртуальній моделі [5]. У публікації «To Go Where No Man Has Gone Before: Virtual Reality in Architecture, Landscape Architecture and Environmental Planning» автори пов'язують вимоги до віртуальної моделі з конкретним завданням [22]. Застосування віртуальної реальності для оцінювання проєктних рішень аналізується у дослідженні «Evaluating the Impact of Virtual Reality on Design Review Meetings» [23]. Ю. Чжан (Y. Zhang) і С. Хуан (X. Huang) у роботі «Integrating Extended Reality in Architectural Design Education: A Systematic Review and Case Study at Southeast University, China» розглядають вплив обладнання, підготовки учасників і структури завдання [24]. Т. Парсонс (T. Parsons) у праці «Virtual Reality for Enhanced Ecological Validity and Experimental Control in the Clinical, Affective and Social Neurosciences» розмежовує експериментальний контроль та екологічну валідність [25]. Відповідність результатів умовам фізичного середовища, таким чином, потребує окремої емпіричної перевірки.

Розглянуті дослідження охоплюють підтримане штучним інтелектом проєктування, цифрову спадщину, геопросторовий аналіз, міські цифрові двійники, партисипативні практики та імерсивне моделювання. У комплексному архітектурному дослідженні ці напрями можуть поєднуватися в межах однієї цифрової системи. Вона здатна одночасно підтримувати історичну реконструкцію, просторовий аналіз, взаємодію з учасниками та дослідження сприйняття. Тому класифікацію за видом інструменту або етапом його застосування доцільно доповнити визначенням доказового статусу отриманого результату. Проведений аналіз засвідчує потребу в методологічній системі проміжного рівня, яка пов'язує дослідницьке питання, тип знання, архітектурні стратегії, традиційні і цифрові процедури, фахову інтерпретацію та межі обґрунтованості результату. Така система має розмежовувати історико-інтерпретативний, просторово-аналітичний, соціокультурно-комунікативний і симуляційно-перцептивний способи формування знання, а також визначати принципи їхнього поєднання в комплексному дослідженні.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розроблення структурованої типології методологічних режимів застосування штучного інтелекту й імерсивних технологій у культурно-контекстному дослідженні архітектурного середовища.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

– проаналізувати архітектурні дослідницькі стратегії та практики використання штучного інтелекту й імерсивних технологій у дослідженні спадщини, просторових структур, локального досвіду та сприйняття середовища;

– обґрунтувати поняття методологічного режиму та критерії розмежування його базових типів;

– визначити склад і особливості чотирьох режимів, способи перевірки отриманих результатів та принципи їхнього поєднання в комплексному дослідженні.

Виклад основного матеріалу. Дослідження має теоретико-методологічний характер і поєднує логічну аргументацію, концептуальний синтез та

порівняльний аналіз наукових й інституційних джерел.

Метод Л. Гроут (L. Groat) і Д. Ванга (D. Wang) використано для співвіднесення дослідницьких питань з історичною, якісною, кореляційною, експериментальною, симуляційною та іншими архітектурними стратегіями [8].

Підхід Й. Джабаріна (Y. Jabareen) застосовано для виявлення, групування та синтезу взаємопов'язаних понять [9].

Джерельний корпус охоплює праці з архітектурної методології, цифрової спадщини, геопросторового аналізу, міських цифрових двійників, партисипативних практик та імерсивного дослідження сприйняття. Документи Організації Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO) і Світового банку (World Bank) використано для визначення таких складників культурного контексту: спадщини, історичної пам'яті, локальних знань, повсякденних практик, ідентичності місця, участі, інклюзії та інституційних умов [6; 7]. Цілеспрямований відбір джерел враховував наявність сформульованого дослідницького питання, визначених вихідних матеріалів, цифрових функцій, процедур фахової інтерпретації, форми результату та меж його обґрунтованості. Основу корпусу становили рецензовані наукові праці й інституційні документи з описаною дослідницькою процедурою; технічні матеріали виконували допоміжну роль.

Порівняльний аналіз дав змогу виокремити чотири групи пізнавальних завдань: історико-культурну інтерпретацію середовища, виявлення просторових закономірностей, формування локального соціокультурного знання та дослідження сприйняття в модельованих умовах. Для кожної групи визначено дослідницькі стратегії, вихідні матеріали, функції цифрових технологій, процедури фахової перевірки, форми результатів і межі їхньої обґрунтованості.

Фахову перевірку здійснює архітектор-дослідник самостійно або із залученням фахівців відповідної предметної галузі шляхом зіставлення з джерелами і вихідними даними, експертного оцінювання, натурного обстеження, повторного аналізу або порівняння з даними фізичного середовища. На цій основі класифікацію цифрових інструментів було перетворено на типологію методологічних конфігурацій їхнього застосування.

У структурі архітектурного дослідження цифрові технології забезпечують пошук, опрацювання, представлення та перевірку матеріалу. Тип отриманого знання визначають дослідницьке питання та процедура інтерпретації. Тому та сама віртуальна модель може представляти історичну гіпотезу, підтримувати просторовий аналіз, комунікацію з учасниками або дослідження навігації. Методологічний статус цифрової операції залежить від її функції, вихідного матеріалу та способу обґрунтування результату.

Для опису такої конфігурації запропоновано поняття методологічного режиму. Дослідницька стратегія задає загальну логіку роботи, процедура визначає конкретну операцію, а режим поєднує домінантне питання, одну або кілька стратегій, цифрові засоби, фахову інтерпретацію та форму отриманого знання. Це поняття можна застосовувати до різних платформ, алгоритмів та імерсивних пристроїв.

Методологічний режим застосування штучного інтелекту та імерсивних технологій – це конфігурація проміжного рівня, яка, відповідно до дослідницького питання, поєднує пізнавальне завдання, дослідницькі стратегії, вихідні матеріали, традиційні і цифрові процедури, функції технологій, фахову інтерпретацію, форму знання та межі обґрунтованості результату. У структурі дослідження він забезпечує послідовний перехід від формулювання проблеми і дослідницького питання до вибору стратегій і процедур, отримання та інтерпретації свідчень, а також визначення меж обґрунтованості висновків.

Основним критерієм розмежування режимів є домінантне пізнавальне завдання. Додатковими критеріями є тип матеріалів, предмет уваги, форма знання, процедура перевірки та межі висновку. Віртуальна реальність може належати до історико-інтерпретативного режиму, якщо її використовують для зіставлення реконструктивних гіпотез; до соціокультурно-комунікативного режиму, якщо вона забезпечує обговорення з учасниками; до симуляційно-перцептивного режиму, якщо за її допомогою збирають дані про навігацію та сприйняття.

Штучний інтелект може виконувати пошукові, класифікаційні, аналітичні, генеративні та допоміжні інтерпретативні функції. Доказовий статус його результатів встановлюють з урахуванням походження й якості даних, культурного контексту, обмежень моделі та фахової інтерпретації.

Концептуальний синтез дав змогу виокремити історико-інтерпретативний, просторово-аналітичний, соціокультурно-комунікативний і симуляційно-перцептивний режими. Чотири

методологічні режими доповнюються рівнем інтеграції та узагальнення результатів, на якому різні типи свідчень зіставляють, визначають їхнє взаємне підтвердження, доповнення або суперечності та на цій основі формують цілісне професійне архітектурне судження. У теоретичному значенні його можна визначити як метарівень, оскільки предметом аналізу тут є не первинні матеріали, а результати й висновки окремих методологічних режимів.

Історико-інтерпретативний режим спрямований на дослідження формування, трансформацій і культурних значень архітектурного середовища в часовій перспективі. Його домінантне питання стосується попередніх станів об'єкта, послідовності просторових і функціональних змін, способів використання та сучасного осмислення минулого. Методологічну основу режиму становлять історичне дослідження, вивчення конкретного випадку, якісна інтерпретація, порівняльний і морфологічний аналіз, натурне обстеження та симуляційне моделювання [8].

Джерельну основу становлять архівні тексти, креслення, карти, фотографії, кінохроніка, інвентаризаційні й археологічні матеріали, усні свідчення та матеріальні сліди перебудов. Доказове значення залежить від походження, призначення, повноти та умов створення. Креслення може відображати проєктний задум або реалізований стан, фотографія фіксує конкретний ракурс і момент часу, а усна історія передає індивідуальну чи колективну пам'ять. Тому джерелознавчий аналіз охоплює перевірку походження й надійності матеріалів, їхнє хронологічне та змістове зіставлення, а також виявлення суперечностей, прогалин і рівнів достовірності.

Штучний інтелект підтримує оптичне розпізнавання символів (Optical character recognition, OCR), транскрибування, семантичний пошук, виокремлення імен, дат і топонімів, класифікацію матеріалів та зіставлення різночасових зображень. Генеративні моделі також можуть створювати реконструктивні гіпотези, які потребують додаткової перевірки. У дослідженні геогліфів Наска алгоритмічний аналіз аерофотографій поєднано з експертним оцінюванням і польовим обстеженням, що дало змогу виявити й підтвердити 303 нові фігуративні геогліфи [12]. Отже, штучний інтелект збільшує обсяг опрацьованих матеріалів і підтримує пошук, але доказове значення та культурно-історичне тлумачення результатів визначає фахівець.

Імерсивні технології дають змогу просторово зіставляти різночасові стани, представляти альтернативні реконструкції та пов'язувати джерела з цифровою моделлю. Їхнє застосування потребує дотримання вимог до точності, автентичності та культурної чутливості [2; 3]. Щоб забезпечити прозорість реконструкції, у моделі доцільно розмежовувати документально підтверджені, інтерпретативно відновлені та гіпотетично доповнені елементи, зазначаючи походження матеріалів і рівень невизначеності.

Результатами режиму можуть бути історико-аналітичний виклад, хронологія, карта трансформацій, типологія станів або цифрова реконструкція з позначеним рівнем достовірності. Алгоритмічно виявлена подібність має статус пошукової ознаки, генеративне доповнення є реконструктивною гіпотезою, а імерсивна модель слугує формою просторового представлення такої гіпотези. Обґрунтованість історичного висновку залежить від зіставлення джерел, перевірки їхнього походження та фахової інтерпретації.

Просторово-аналітичний режим спрямований на виявлення просторових зв'язків, закономірностей, нерівномірностей і змін архітектурного середовища в часі. Його домінантне питання стосується зв'язків між просторовою будовою, функціями, переміщеннями людей, доступністю, культурними ресурсами, соціальними практиками та екологічними умовами. Методологічну основу режиму становлять кореляційне дослідження, просторовий і морфологічний аналіз, геоінформаційні методи, вивчення окремого випадку та симуляційне моделювання [8]. Виявлений зв'язок між показниками не є автоматичним поясненням причин його виникнення або культурного значення, тому потребує додаткової інтерпретації.

Вихідними матеріалами є топографічні й кадастрові дані, плани, геоінформаційні шари, матеріали дистанційного зондування, реєстри культурної спадщини, відомості про землекористування та переміщення людей, дані цифрових сервісів і сенсорів, а також результати партисипативного картографування. До культурного контексту належать не лише облікові об'єкти спадщини й охоронні зони, а й локальні знання, повсякденні практики, доступність, участь громад, діяльність інституцій та ідентичність місця [6; 7]. Облікові об'єкти можна відобразити на карті, тоді як пам'ять, символічна цінність і локальні значення потребують історичного та якісного аналізу.

Штучний інтелект підтримує класифікацію й групування даних, розпізнавання зображень,

виявлення відхилень, прогнозування змін і порівняння сценаріїв. Надійність результатів залежить від походження, повноти та репрезентативності даних. Наприклад, дані мобільних пристроїв відображають поведінку лише їхніх користувачів, офіційні реєстри охоплюють тільки облікові об'єкти, а онлайн-відгуки нерівномірно представляють різні соціальні та вікові групи. Тому алгоритмічний аналіз відображає лише ту частину середовища, яку вдалося подати у формі даних, і має доповнюватися іншими джерелами.

Важливо також чітко визначати зміст кожного показника. Так, доступність може означати відстань, час пересування, транспортну досяжність, безбар'єрність або фактичну можливість користування простором для різних соціальних груп. Під час опрацювання геолокованих коментарів необхідно документувати принципи класифікації первинних висловлювань за певними категоріями, аналітичними шарами або узагальненими показниками [17].

Одним із цифрових середовищ цього режиму є міський цифровий двійник, який поєднує дані, моніторинг, моделювання, прогнозування та засоби підтримки рішень [13]. У цифровому двійнику Герренберга тривимірну модель доповнено даними мобільності, просторовим аналізом, симуляціями, якісними матеріалами та віртуальною реальністю [4]. Проте цифровий двійник не є повним відтворенням міста, оскільки його зміст залежить від доступних даних, вибраних показників і дослідницьких припущень.

Людиноцентричний підхід передбачає доповнення цифрового двійника даними про сприйняття середовища користувачами (Perception-powered urban digital twin) [15]. У такій моделі просторові характеристики зіставляються із суб'єктивними оцінками. Отримані результати відображають досвід конкретної групи учасників і залежать як від її складу, так і формулювання завдань та умов проведення дослідження.

У просторово-аналітичному режимі імерсивні технології переважно використовують для представлення аналітичних шарів, різночасових станів і сценаріїв розвитку. Якщо ж предметом дослідження стають реакції користувачів на масштаб, освітлення, видимість або навігацію, імерсивна модель виконує функцію контрольованого дослідницького середовища і належить до симуляційно-перцептивного режиму.

Результатами просторово-аналітичного режиму можуть бути карти, типології, моделі доступності, групи просторових об'єктів, шари цифрового двійника та сценарії трансформацій. Виявлена просторова закономірність є аналітичною ознакою, групування показує подібність об'єктів за визначеними параметрами, а кореляція фіксує статистичний зв'язок. Висновки про причини, культурне значення та доцільність архітектурних рішень формують шляхом зіставлення кількісних результатів з історичними, якісними та контекстуальними матеріалами.

Соціокультурно-комунікативний режим спрямований на виявлення локальних знань, культурної пам'яті, повсякденних практик, потреб, цінностей і відмінностей між позиціями різних груп. Його домінантне питання полягає в тому, як учасники сприймають, використовують і осмислюють простір та як їхній досвід може бути врахований в архітектурному дослідженні. Комунікація в цьому режимі є способом отримання, зіставлення й уточнення знань про соціокультурний контекст середовища.

Методологічну основу режиму становлять партисипативні та етнографічні підходи, аналіз окремого випадку, дослідження дією та співпроєктування [8]. Матеріалами можуть бути інтерв'ю, фокус-групи, усні історії, спостереження, ментальні карти, щоденники, партисипативне картографування, публічні обговорення та коментарі, пов'язані з конкретними місцями. Зміст цих матеріалів залежить від досвіду учасників, формулювання запитань, умов взаємодії та позиції дослідника.

Штучний інтелект може підтримувати транскрибування, переклад, анонімізацію, попереднє тематичне кодування та групування висловлювань. Автоматизоване опрацювання полегшує роботу з великими масивами матеріалів, однак не замінює фахового тлумачення культурних посилань, іронії, емоційного забарвлення та локальних значень. Частота згадування певної теми відображає насамперед структуру зібраних матеріалів і активність представлених груп. Тому дослідник має враховувати склад учасників, бар'єри доступу та позиції, недостатньо представлені в дослідженні.

Імерсивні технології дають змогу пов'язувати висловлювання учасників із конкретними просторовими характеристиками, зокрема масштабом, маршрутом, видимістю та розташуванням елементів. Вони можуть використовуватися для проведення інтерв'ю у змодельованому середовищі, представлення особистого досвіду, спільного перегляду сценаріїв і прив'язки коментарів до цифрової

моделі. Це полегшує участь людей, які не вміють читати креслення та іншу архітектурну графіку. Водночас результативність участі із застосуванням технологій розширеної реальності залежить від рівня залучення, складу учасників, доступності технології та інституційних умов [19].

Реальний рівень участі визначається тим, наскільки учасники можуть впливати на формулювання проблеми, критерії оцінювання та ухвалення рішень. Можливість залишати коментарі, голосувати або переміщувати об'єкти в цифровій моделі сама по собі не гарантує такого впливу. С. Маршалл та співавтори пов'язують формальний характер цифрової участі зі збереженням попереднього розподілу професійних та управлінських повноважень [18].

К. Кролла та співавтори використали імерсивні технології під час навчальних архітектурних переглядів для обговорення масштабу й просторових наслідків рішень [20]. П. Нг та співавтори показали, що міжпоколінне співпроєктування залежить від вікового складу груп, розподілу ролей та організації роботи з віртуальною реальністю (Virtual reality, VR) [21].

Перетворення матеріалів обговорення на архітектурні категорії має бути прозорим і документованим. Під час кодування, узагальнення та візуалізації первинне висловлювання змінює форму й може частково втратити початковий контекст [17]. Тому в дослідженні необхідно простежувати, як коментар або картографічна позначка перетворюється на тематичну категорію, просторовий шар і професійний висновок.

Результатами режиму можуть бути карти позицій учасників, систематизовані локальні свідчення, просторово прив'язані коментарі, переліки культурно значущих місць і практик, а також виявлені точки згоди й конфлікту. Автоматизоване групування є лише попередньою систематизацією матеріалу, цифрова інтерактивність характеризує спосіб взаємодії, а кількісна перевага певної позиції показує лише її представленість у зібраному масиві. Обґрунтована інтерпретація має враховувати контекст висловлювань, склад учасників, недостатньо представлені позиції та професійні критерії архітектурного рішення.

Симуляційно-перцептивний режим спрямований на дослідження того, як змодельовані характеристики архітектурного середовища впливають на сприйняття, орієнтування, навігацію та поведінку користувачів. Його домінантне питання стосується реакцій людини на масштаб, конфігурацію, видимість, освітлення, маршрути, орієнтири й доступність, а також можливості застосування отриманих результатів до фізичного середовища.

Методологічну основу режиму становлять симуляційні, експериментальні, квазіекспериментальні та кореляційні підходи, поведінкове спостереження й порівняння досвіду у фізичному та віртуальному середовищах [8]. Імерсивна модель виконує функцію контрольованого дослідницького середовища, у якому можна змінювати окремі просторові параметри та фіксувати реакції учасників відповідно до сформульованої гіпотези й обраних показників.

Вихідними матеріалами можуть бути тривимірні та інформаційні моделі, XR-середовища, параметричні сценарії, анкети, результати спостережень, траєкторії руху, тривалість виконання завдань, кількість помилок і напрями погляду. Надійність результатів залежить від того, наскільки модель відповідає дослідницькому питанню. Для вивчення навігації необхідно точно відтворити геометрію простору, маршрути й орієнтири. Оцінювання освітлення потребує коректного моделювання світла, матеріалів і характеристик пристрою відображення. Під час дослідження безбар'єрності варто враховувати спосіб пересування, антропометричні характеристики користувачів та обмеження інтерфейсу.

Імерсивні технології дають змогу контрольовано відтворювати просторові умови, здійснювати інтерактивну навігацію та порівнювати проєктні альтернативи до їхньої реалізації. Точність дослідження залежить не від максимальної деталізації моделі, а від правильного відтворення характеристик, що безпосередньо пов'язані з поставленим питанням. Спрощена модель дає змогу виокремити вплив одного параметра, тоді як деталізована – придатна для комплексного оцінювання кількох взаємопов'язаних характеристик. М. Портман та співавтори також наголошують, що вимоги до віртуального середовища залежать від галузі та конкретного завдання [22].

С. Куліга з колегами порівняли досвід користувачів у реальній будівлі та її віртуальній моделі [5]. Кількісні оцінки виявили небагато відмінностей, тоді як якісний аналіз засвідчив розбіжності у сприйнятті атмосфери середовища. Це підтверджує дослідницький потенціал віртуальної реальності, але обмежує автоматичне перенесення результатів на фізичний простір.

Штучний інтелект може підтримувати генерування варіантів, адаптацію сценаріїв,

моделювання поведінки умовних користувачів, аналіз траєкторій, помилок і напрямів погляду, а також виявлення повторюваних реакцій. Отримані цифрові показники необхідно зіставляти зі спостереженнями, анкетами та оцінками самих учасників. Зафіксована реакція може бути зумовлена не лише просторовою конфігурацією, а й особливостями інтерфейсу, дискомфортом від використання обладнання або попереднім досвідом людини.

Відчуття присутності характеризує суб'єктивне переживання перебування у віртуальному середовищі. Екологічна валідність показує, наскільки умови та реакції, відтворені в дослідженні, відповідають реальному просторовому досвіду [25]. Тому можливість перенесення результатів залежить від способу пересування, поля зору, точності відстеження рухів, сенсорного зворотного зв'язку, складу учасників і формулювання завдання.

Результатами режиму можуть бути порівняльні дані про сприйняття й поведінку, карти траєкторій і ділянок, у яких учасники відчували труднощі, виявлені навігаційні та перцептивні бар'єри, а також уточнені просторові гіпотези. Візуальна реалістичність характеризує спосіб представлення середовища, рівень занурення визначає інтенсивність взаємодії з ним, а відчуття присутності передає суб'єктивний досвід учасника. Висновки щодо фізичного простору можуть вважатися обґрунтованими лише з урахуванням точності моделі, структури завдання, складу вибірки та результатів додаткової емпіричної перевірки.

Порівняння розглянутих конфігурацій засвідчує, що методологічні режими розрізняються за домінантним дослідницьким питанням, вихідними матеріалами, типом отриманого знання, функціями цифрових засобів, роллю дослідника та межами обґрунтованості висновку. Конкретне програмне забезпечення, модель штучного інтелекту або тип імерсивного пристрою належать до інструментальних характеристик і можуть використовуватися в різних режимах. Їхню узагальнену характеристику подано в таблиці 1.

Деякі функції штучного інтелекту та імерсивних технологій повторюються в різних режимах, але мають різний методологічний статус. Класифікація зображень може підтримувати зіставлення історичних джерел або аналіз сучасної забудови, а імерсивна модель може представляти реконструктивну гіпотезу, аналітичні дані, матеріал для обговорення чи контрольоване експериментальне середовище. Статус цифрової операції визначають дослідницьке питання, вихідні матеріали та спосіб обґрунтування висновку.

Методологічні режими можуть застосовуватися окремо, паралельно або поєднуватися в комплексному дослідженні. Наприклад, вивчення історичного громадського простору може охоплювати аналіз джерел, картографування потоків, інтерв'ю з мешканцями та імерсивне тестування сценаріїв. Отримані результати зіставляють, зберігаючи відмінності між історичною достовірністю, просторовими закономірностями, позиціями учасників і даними про сприйняття.

Таке зіставлення здійснюється на рівні інтеграції та узагальнення результатів. Його вихідними матеріалами є висновки чотирьох режимів, доповнені нормативними, технічними, етичними та проєктними умовами. На цьому рівні визначають, чи підтверджують, доповнюють або суперечать один одному різні типи свідчень.

Штучний інтелект підтримує систематизацію аргументів, виявлення суперечностей, порівняння сценаріїв і простеження джерел, а імерсивні технології дають змогу зіставляти просторові наслідки альтернатив. Дослідник оцінює сумісність результатів, визначає пріоритети та формує професійне архітектурне судження. Виявлені культурні, функціональні й соціальні суперечності мають відображатися у висновку, а не зводитися до єдиного показника.

Запропонована типологія систематизує способи формування архітектурного знання, а не види програмного забезпечення. Генерування, класифікація, прогнозування та імерсивне представлення є наскрізними функціями, статус яких залежить від дослідницького питання. Так, генеративна модель може створювати реконструктивну гіпотезу, аналітичний сценарій, матеріал для обговорення або експериментальне середовище, а міський цифровий двійник може підтримувати різні режими [4; 13].

Межі між режимами є проникними, проте їх розрізняють за домінантним пізнавальним завданням. Цифровий двійник належить до історико-інтерпретативного режиму під час порівняння різночасових станів, до просторово-аналітичного у процесі моніторингу змін і до симуляційно-перцептивного, коли досліджується навігація або видимість. Якщо до моделі залучають коментарі учасників, необхідно документувати їхнє перетворення на тематичні категорії, картографічні шари та узагальнені показники [17].

Фахова інтерпретація визначає доказове значення результатів у кожному режимі. Дослідник перевіряє історичні джерела, конкретизує

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методологічних режимів застосування ШІ та імерсивних технологій.

Режим	Дослідницьке завдання і тип знання	Матеріали та стратегії	Функції ШІ та імерсивних технологій	Результат і межі обґрунтованості
Історико-інтерпретативний	Вивчення формування, трансформацій і культурних значень середовища. Історичне, діахронічне та джерелознавче знання.	Архівні тексти, креслення, карти, фотографії, усні свідчення, матеріальні сліди; історичне дослідження, дослідження окремого випадку, якісна інтерпретація, порівняльний аналіз.	**ШІ:** пошук, розпізнавання, класифікація, зіставлення джерел і формування гіпотез. **Імерсивні технології:** представлення часових шарів і варіантів реконструкції.	Історико-аналітичний виклад, карта трансформацій або цифрова реконструкція з позначеним рівнем достовірності. Генеративне доповнення має статус гіпотези; обґрунтованість визначають перевірка й зіставлення джерел.
Просторово-аналітичний	Виявлення просторових структур, закономірностей, нерівномірностей і кореляцій. Структурне, реляційне та геопросторове знання.	Геоінформаційні, кадастрові, топографічні й сенсорні дані, потоки та цифрові сліди; кореляційне дослідження, просторовий і морфологічний аналіз, симуляційне моделювання.	**ШІ:** класифікація, кластеризація, комп'ютерний зір, прогнозування й порівняння сценаріїв. **Імерсивні технології:** представлення аналітичних шарів, часових станів і сценаріїв.	Карти, типології, кластери, моделі доступності та шари цифрового двійника. Просторова закономірність і кореляція потребують додаткового пояснення причинності та культурного значення.
Соціокультурно-комунікативний	Виявлення локальних знань, пам'яті, практик, потреб і позицій учасників. Контекстуальне знання про локальний досвід і позиції учасників.	Інтерв'ю, фокус-групи, усні історії, спостереження, ментальні карти й партисипативне картографування; партисипативні та етнографічні підходи, дослідження дією, співпроєктування.	**ШІ:** транскрибування, переклад, анонімізація, попереднє кодування й групування висловлювань. **Імерсивні технології:** просторове інтерв'ю, уточнення досвіду та спільне обговорення сценаріїв.	Карти позицій, систематизовані локальні свідчення та просторово прив'язані коментарі. Автоматизоване групування є попередньою систематизацією; обґрунтованість залежить від складу учасників, доступності процедури та їхнього реального впливу.
Симуляційно-перцептивний	Дослідження впливу просторових характеристик на сприйняття, навігацію та поведінку. Перцептивне, поведінкове й симуляційне знання.	Тривимірні й інформаційні моделі, XR-середовища, траєкторії, анкети та спостереження; симуляційні, експериментальні, квазіекспериментальні й кореляційні дослідження.	**ШІ:** генерування варіантів, агентне моделювання, аналіз траєкторій, помилок і поведінкових закономірностей. **Імерсивні технології:** контрольоване відтворення та порівняння просторових умов.	Дані сприйняття й поведінки, карти траєкторій і виявлені просторові бар'єри. Перенесення результатів залежить від точності моделі, структури завдання, складу вибірки та емпіричної перевірки.

просторові показники, оцінює репрезентативність соціокультурних даних і встановлює умови перенесення результатів імерсивного експерименту. Штучний інтелект підтримує аналіз, але культурну значущість, автентичність, доступність і допустимий рівень трансформації визначають шляхом професійного та суспільного обговорення.

Рівень інтеграції та узагальнення особливо важливий за суперечностей між історичною достовірністю, функціональною ефективністю, культурною пам'яттю, інклюзивністю та комфортом сприйняття. Визначення пріоритетів, обґрунтування компромісів і відповідальність за архітектурний висновок залишаються за дослідником або архітектором.

Теоретичне значення типології полягає у визначенні проміжного рівня між загальною архітектурною методологією та конкретними дослідницькими процедурами. Вона дає змогу зіставити дослідницьке питання з типом свідчень, функціями штучного інтелекту й імерсивних технологій, способами фахової перевірки та межами обґрунтованого висновку. У дослідницькій, професійній та освітній практиці типологія може використовуватися для оцінювання доцільності цифрових засобів.

Запропонована система має теоретичний і попередній характер, оскільки сформована шляхом цілеспрямованого концептуального синтезу, спирається на нерівномірну емпіричну базу та передбачає проникність меж між режимами. Її подальша апробація має охоплювати аналіз завершених архітектурних і урбаністичних досліджень, перевірку узгодженості класифікації незалежними експертами та застосування всіх режимів у межах одного комплексного культурно-контекстного дослідження.

Висновки і перспективи використання результатів дослідження. Проведений аналіз засвідчив, що методологічний статус штучного інтелекту та імерсивних технологій визначається не видом інструмента, а дослідницьким питанням, вихідними матеріалами, обраною стратегією, процедурою фахової перевірки та формою результату. Одна й та сама цифрова операція може бути використана для історичної інтерпретації, просторового аналізу, дослідження позицій учасників або сприйняття, формуючи різні типи архітектурного знання.

Для розмежування таких конфігурацій обґрунтовано поняття методологічного режиму як проміжної ланки між загальною архітектурною методологією та конкретними процедурами. Відповідно до домінантного дослідницького питання режим узгоджує пізнавальне завдання, стратегії, вихідні матеріали, традиційні й цифрові процедури, функції технологій, фахову інтерпретацію, форму знання та межі обґрунтованості результату.

Виокремлено чотири базові режими. Історико-інтерпретативний розмежовує документовані свідчення, фахові інтерпретації та реконструктивні гіпотези. Просторово-аналітичний виявляє структури, розподіли, кореляції та зміни, не ототожнюючи їх із причинністю чи культурним значенням. Соціокультурно-комунікативний формує знання про локальний досвід, пам'ять, практики та позиції учасників. Симуляційно-перцептивний досліджує сприйняття, навігацію й поведінкові реакції; перенесення його результатів залежить від точності моделі, структури завдання, складу вибірки та емпіричної перевірки.

Рівень інтеграції та узагальнення результатів дає змогу виявляти взаємне підтвердження, доповнення або суперечності між різними типами свідчень. Штучний інтелект підтримує систематизацію матеріалів і порівняння сценаріїв, а імерсивні технології представляють просторові наслідки альтернатив. Визначення пріоритетів, обґрунтування компромісів і відповідальність за висновок залишаються за дослідником або архітектором.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в переході від класифікації цифрових технологій за інструментами та функціями до типології способів формування архітектурного знання. Практичне значення типології полягає в можливості використовувати її для побудови структури дослідження, уточнення питання, добору процедур і типів свідчень та визначення меж обґрунтованого висновку.

Обмеження роботи пов'язані з теоретичним характером типології, цілеспрямованим відбором джерел, нерівномірністю емпіричної бази та проникністю меж між режимами. Подальша апробація передбачає аналіз завершених досліджень, експертну перевірку узгодженості класифікації, уточнення критеріїв межових випадків і застосування всіх режимів у комплексному культурно-контекстному дослідженні.

Інформація про використання штучного інтелекту. *Під час підготовки статті інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для мовного редагування, перевірки граматики, перекладу або інших допоміжних завдань, без використання згенерованих ними об'єктів як результатів академічної діяльності.*

Список використаних джерел

1. Castro Pena M. L., Carballal A., Rodríguez-Fernández N., Santos I., Romero J. Artificial intelligence applied to conceptual design: A review of its use in architecture. *Automation in Construction.* 2021. Vol. 124. Article 103550. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103550

2. Bekele M. K., Pierdicca R., Frontoni E., Malinverni E. S., Gain J. A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage.* 2018. Vol. 11, No. 2. Article 7. P. 1–36. DOI: 10.1145/3145534

3. Jiang L., Li J., Wider W., Tanucan J. C. M., Lobo J., Fauzi M. A., Hidayat H., Zou R. A bibliometric insight into immersive technologies for cultural heritage preservation. *npj Heritage Science.* 2025. Vol. 13. Article 126. DOI: 10.1038/s40494-025-01704-z

4. Dembski F., Wössner U., Letzgus M., Ruddat M., Yamu C. Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability.* 2020. Vol. 12, No. 6. Article 2307. DOI: 10.3390/su12062307

5. Kuliga S. F., Thrash T., Dalton R. C., Hölscher C. Virtual reality as an empirical research tool: Exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model. *Computers, Environment and Urban Systems.* 2015. Vol. 54. P. 363–375. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.09.006

6. *UNESCO.* Culture|2030 Indicators. Paris : UNESCO, 2019. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371562 (дата звернення: 19.07.2026).

7. *UNESCO, World Bank.* Cities, Culture, Creativity: Leveraging Culture and Creativity for Sustainable Urban Development and Inclusive Growth. Paris : UNESCO ; Washington, DC : World Bank, 2021. DOI: 10.1596/978-92-3-100452-0

8. Groat L. N., Wang D. Architectural Research Methods. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2013. 468 p.

9. Jabareen Y. Building a conceptual framework: Philosophy, definitions, and procedure. *International Journal of Qualitative Methods.* 2009. Vol. 8, No. 4. P. 49–62. DOI: 10.1177/160940690900800406

10. Shneiderman B. Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. *International Journal of Human–Computer Interaction.* 2020. Vol. 36, No. 6. P. 495–504. DOI: 10.1080/10447318.2020.1741118

11. Campo-Ruiz I. Artificial intelligence may affect diversity: Architecture and cultural context reflected through ChatGPT, Midjourney, and Google Maps. *Humanities and Social Sciences Communications.* 2025. Vol. 12. Article 24. DOI: 10.1057/s41599-024-03968-5

12. Sakai M., Sakurai A., Lu S., Olano J., Albrecht C. M., Hamann H. F., Freitag M. AI-accelerated Nazca survey nearly doubles the number of known figurative geoglyphs and sheds light on their purpose. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2024. Vol. 121, No. 40. Article e2407652121. DOI: 10.1073/pnas.2407652121

13. Mazzetto S. A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability.* 2024. Vol. 16, No. 19. Article 8337. DOI: 10.3390/su16198337

14. Ketzler B., Naserentin V., Latino F., Zangelidis C., Thuvander L., Logg A. Digital twins for cities: A state of the art review. *Built Environment.* 2020. Vol. 46, No. 4. P. 547–573. DOI: 10.2148/benv.46.4.547

15. Luo J., Liu P., Xu W., Zhao T., Biljecki F. A perception-powered urban digital twin to support human-centered urban planning and sustainable city development. *Cities.* 2025. Vol. 156. Article 105473. DOI: 10.1016/j.cities.2024.105473

16. Moroni S. Insurmountable limitations of city-scale digital twins? On urban knowledge and planning. *Computational Urban Science.* 2025. Vol. 5. Article 17. DOI: 10.1007/s43762-025-00174-0

17. Ataman C., Tunçer B., Perrault S. Digital participation in urban design and planning: Addressing data translation challenges in urban policy- and decision-making through visualization techniques. Accelerated Design: Proceedings of the 29th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2024) / eds. N. Gardner, C. M. Herr, L. Wang, H. Toshiki, S. A. Khan. Vol. 2. Singapore : CAADRIA, 2024. P. 201–210. DOI: 10.52842/conf.caadria.2024.2.201

18. Marshall S., Farndon D., Hudson-Smith A., Kourniotis A., Karadimitriou N. Urban design and planning participation in the digital age: Lessons from an experimental online platform. *Smart Cities.* 2024. Vol. 7, No. 1. P. 615–632. DOI: 10.3390/smartcities7010025

19. Simonofski A., Johannessen M. R., Stendal K. Extended reality for citizen participation: A conceptual framework, systematic review and research agenda. *Sustainable Cities and Society.* 2024. Vol. 113. Article 105692. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105692

20. Crolla K., Song J., Bunica A., Sheikh A. T. Integrating extended reality in architectural design studio teaching and reviews: Implementing a participatory action research framework. *Buildings.* 2024. Vol. 14, No. 6. Article 1865. DOI: 10.3390/buildings14061865

21. Ng P., Zhu S., Li Y., van Ameijde J. Intergenerational cooperation and co-creation in public space design assisted by virtual reality environments. *Architectural Intelligence.* 2025. Vol. 4. Article 1. DOI: 10.1007/s44223-024-00080-1

22. Portman M. E., Natapov A., Fisher-Gewirtzman D. To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems.* 2015. Vol. 54. P. 376–384. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001

23. Liu Y., Castronovo F., Messner J., Leicht R. Evaluating the impact of virtual reality on design review meetings. *Journal of Computing in Civil Engineering.* 2020. Vol. 34, No. 1. Article 04019045. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000856

24. Zhang Y., Huang X. Integrating extended reality in architectural design education: A systematic review and case study at Southeast University, China. *Buildings.* 2024. Vol. 14, No. 12. Article 3954. DOI: 10.3390/buildings14123954

25. Parsons T. D. Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience.* 2015. Vol. 9. Article 660. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00660

References

1. Castro Pena, M. L., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design: A review of its use in architecture. *Automation in Construction,* 124, Article 103550. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103550 [in English].

2. Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage,* 11(2), Article 7, 1–36. https://doi.org/10.1145/3145534 [in English].

3. Jiang, L., Li, J., Wider, W., Tanucan, J. C. M., Lobo, J., Fauzi, M. A., Hidayat, H., & Zou, R. (2025). A bibliometric insight into immersive technologies for cultural heritage preservation. *npj Heritage Science,* 13, Article 126. https://doi.org/10.1038/s40494-025-01704-z [in English].

4. Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability,* 12(6), Article 2307. https://doi.org/10.3390/su12062307 [in English].

5. Kuliga, S. F., Thrash, T., Dalton, R. C., & Hölscher, C. (2015). Virtual reality as an empirical research tool: Exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model. *Computers, Environment and Urban Systems,* 54, 363–375. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.09.006 [in English].

6. *UNESCO.* (2019). Culture|2030 indicators. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000371562 [in English].

7. *UNESCO, & World Bank.* (2021). Cities, culture, creativity: Leveraging culture and creativity for sustainable urban development and inclusive growth. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-92-3-100452-0 [in English].

8. Groat, L. N., & Wang, D. (2013). Architectural research methods (2nd ed.). Wiley [in English].

9. Jabareen, Y. (2009). Building a conceptual framework: Philosophy, definitions, and procedure. *International Journal of Qualitative Methods,* 8(4), 49–62. https://doi.org/10.1177/160940690900800406 [in English].

10. Shneiderman, B. (2020). Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. *International Journal of Human–Computer Interaction,* 36(6), 495–504. https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1741118 [in English].

11. Campo-Ruiz, I. (2025). Artificial intelligence may affect diversity: Architecture and cultural context reflected through ChatGPT, Midjourney, and Google Maps. *Humanities and Social Sciences Communications,* 12, Article 24. https://doi.org/10.1057/s41599-024-03968-5 [in English].

12. Sakai, M., Sakurai, A., Lu, S., Olano, J., Albrecht, C. M., Hamann, H. F., & Freitag, M. (2024). AI-accelerated Nazca survey nearly doubles the number of known figurative geoglyphs and sheds light on their purpose. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 121(40), Article e2407652121. https://doi.org/10.1073/pnas.2407652121 [in English].

13. Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability,* 16(19), Article 8337. https://doi.org/10.3390/su16198337 [in English].

14. Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L., & Logg, A. (2020). Digital twins for cities: A state of the art review. *Built Environment,* 46(4), 547–573. https://doi.org/10.2148/benv.46.4.547 [in English].

15. Luo, J., Liu, P., Xu, W., Zhao, T., & Biljecki, F. (2025). A perception-powered urban digital twin to support human-centered urban planning and sustainable city development. *Cities,* 156, Article 105473. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105473 [in English].

16. Moroni, S. (2025). Insurmountable limitations of city-scale digital twins? On urban knowledge and planning. *Computational Urban Science,* 5, Article 17. https://doi.org/10.1007/s43762-025-00174-0 [in English].

17. Ataman, C., Tunçer, B., & Perrault, S. (2024). Digital participation in urban design and planning: Addressing data translation challenges in urban policy- and decision-making through visualization techniques. In N. Gardner, C. M. Herr, L. Wang, H. Toshiki, & S. A. Khan (Eds.), Accelerated design: Proceedings of the 29th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2024) (Vol. 2, pp. 201–210). *CAADRIA.* https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2024.2.201 [in English].

18. Marshall, S., Farndon, D., Hudson-Smith, A., Kourniotis, A., & Karadimitriou, N. (2024). Urban design and planning participation in the digital age: Lessons from an experimental online platform. *Smart Cities,* 7(1), 615–632. https://doi.org/10.3390/smartcities7010025 [in English].

19. Simonofski, A., Johannessen, M. R., & Stendal, K. (2024). Extended reality for citizen participation: A conceptual framework, systematic review and research agenda. *Sustainable Cities and Society,* 113, Article 105692. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105692 [in English].

20. Crolla, K., Song, J., Bunica, A., & Sheikh, A. T. (2024). Integrating extended reality in architectural design studio teaching and reviews: Implementing a participatory action research framework. *Buildings,* 14(6), Article 1865. https://doi.org/10.3390/buildings14061865 [in English].

21. Ng, P., Zhu, S., Li, Y., & van Ameijde, J. (2025). Intergenerational cooperation and co-creation in public space design assisted by virtual reality environments. *Architectural Intelligence,* 4, Article 1. https://doi.org/10.1007/s44223-024-00080-1 [in English].

22. Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems,* 54, 376–384. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001 [in English].

23. Liu, Y., Castronovo, F., Messner, J., & Leicht, R. (2020). Evaluating the impact of virtual reality on design review meetings. *Journal of Computing in Civil Engineering,* 34(1), Article 04019045. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000856 [in English].

24. Zhang, Y., & Huang, X. (2024). Integrating extended reality in architectural design education: A systematic review and case study at Southeast University, China. *Buildings,* 14(12), Article 3954. https://doi.org/10.3390/buildings14123954 [in English].

25. Parsons, T. D. (2015). Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience,* 9, Article 660. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660 [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 21.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 12.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)