



DOI <https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2026-5-2>
УДК 721:004.8.502.131
ORCID ID: 0000-0002-8470-7956

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*

КЛАСИФІКАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АРХІТЕКТУРІ: ВІДПОВІДАЛЬНО-СТАЛИЙ ВИМІР

Анотація. *Метою дослідження* є обґрунтування та перевірка відповідально-сталого виміру класифікації архітектурних інструментів на основі штучного інтелекту (ШІ), що доповнює техніко-функціональні описи вимірюванням етичних, управлінських та сталих наслідків застосування у проєктній практиці. *Методи дослідження* ґрунтуються на аналізі міжнародних принципів довіреного штучного інтелекту та підходів «Green AI», що були адаптовані до архітектурно-урбаністичного контексту. Далі критерії відповідальності та сталості пророблено через систему індикаторів і шкалу рівня розвитку 0–5. Емпіричну частину виконано як пілотне порівняльне профілювання добірки інструментів за матеріалами відкритої документації та описів практичного використання. За результатами дослідження виокремлено чотири параметри: етика та людський нагляд (R1), управління й нормативна відповідність (R2), обчислювальна сталість (S1), соціально-міська сталість результатів (S2), і запропоновано шкалу рівня розвитку 0–5, що формує профіль R1–R2–S1–S2. Показано наступні закономірності, коли консультативні сервіси частіше мають вищий R1, тоді як масштабні міські системи можуть демонструвати високий S2 за нижчих R1–R2, також зафіксовано відмінності S1 між класами моделей і режимами використання. **Висновки.** Запропонований відповідально-сталий вимір дає змогу прозоро зіставляти ШІ-інструменти за підзвітністю, ресурсними витратами та суспільною користю; результати пілотного профілювання показують типові компроміси між параметрами R1–R2–S1–S2, що важливо для керованого впровадження та управління ризиками в архітектурній і муніципальній практиці.

Ключові слова: класифікація, штучний інтелект в архітектурі, відповідальність, сталість, людський нагляд, ШІ-інструментарій.

Nataliia Vergunova

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

CLASSIFICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN ARCHITECTURE. RESPONSIBLE AND SUSTAINABLE DIMENSION

Abstract. The study substantiates and tests a Responsibility–Sustainability dimension for classifying artificial intelligence (AI) tools in architecture and urban planning. Beyond technical or functional descriptions, the dimension evaluates ethical, governance, and sustainability implications of adopting AI in design and decision-making workflows. **Methods include:** analysis of international trustworthy-AI principles and «Green AI» approaches adapted to the architectural–urban context, operationalization into indicators and content analysis of publicly available documentation (policies, audits, compliance notes, and case descriptions), followed by pilot profiling of a selected tool set. The empirical component was conducted as a pilot comparative profiling of a selected set of tools, drawing on publicly available documentation and open descriptions of practical use. **Results** define four parameters: ethics and human oversight (R1), governance and regulatory alignment (R2), computational sustainability (S1) and socio-urban sustainability outcomes (S2). Each parameter is rated on a 0–5 development scale, producing an R1–R2–S1–S2 profile rather than a single score. Multiple architectural and urban AI tools were analyzed through the Responsibility–Sustainability dimension, profiling each tool against R1–R2–S1–S2 and highlighting recurring trade-offs between human oversight, governance, computational footprint, and socio-urban benefit. The pilot reveals recurring patterns: advisory «co-pilot» tools typically show higher R1, while city-scale systems can achieve high S2 with weaker R1–R2, S1 differs substantially across model classes and usage regimes. **Conclusions.** The proposed Responsibility–Sustainability dimension enables transparent comparison of AI tools in

terms of accountability, resource footprint, and public value; the pilot profiling results reveal recurring trade-offs among the R1–R2–S1–S2 parameters, which is important for controlled implementation and risk management in architectural and municipal practice.

Key words: classification, AI in architecture, responsibility, sustainability, human oversight, AI tools.

Постановка проблеми та актуальність теми.

Сучасна архітектурна практика та міський дизайн демонструють стрімке поширення інструментів на основі штучного інтелекту (ШІ) для генеративного пошуку форми, прогнозу аналітики й автоматизації рутинних завдань [1; 2]. Водночас поряд із функціональними перевагами такі інструменти актуалізують питання етики, відповідальності і сталості у формуванні середовища життєдіяльності [3]. Попри те, що вже окреслюються класифікаційні підходи до архітектурного ШІ, переважно через функціонально-результативний, інформаційно-алгоритмічний та процесно-цикловий виміри класифікації [4], такі підходи здебільшого не передбачають прямого оцінювання того, наскільки інструмент є «відповідальним» або «сталим». Унаслідок цього ускладнюється обґрунтований добір і управління ШІ-інструментами в проєктах, особливо там, де критичними є прозорість рішень, підзвітність, енергетична ефективність і вплив на довкілля.

Показовою є ситуація, коли два інструменти можуть забезпечувати подібні планувальні результати, проте істотно відрізнятися ресурсомісткістю хмарних обчислень і, відповідно, екологічним аспектом сталості [5]. Аналогічно, інструменти ШІ для керування трафіком і для перевірки відповідності інформаційного моделювання будівель (Building information modeling, BIM) можуть застосовувати подібний алгоритмічний підхід, але мати принципово різні режими людського нагляду та механізми управління, наприклад, автономне «міське» керування проти консультативної перевірки норм [6].

Актуальність формування оцінювального підходу посилюється зростанням міжнародного консенсусу щодо довіреного й сталого ШІ: нормативно-методичні документи підкреслюють людський нагляд, підзвітність, суспільне благополуччя та екологічну сталість як базові принципи [7; 8]. Підхід Європейської Комісії (European Commission) до довіреного ШІ операционалізує ці вимоги через перелік Assessment List for Trustworthy Artificial Intelligence (ALTAI) [2], а Рекомендація ЮНЕСКО 2021 року додатково закріплює орієнтацію ШІ на права людини та екологічну сталість [7]. У секторі архітектури, інженерії та будівництва (Architecture, Engineering,

Construction; АЕС) дискурс «відповідального ШІ» зосереджений на мінімізації упереджень, забезпеченні людського контролю та збереженні творчої агентивності [3; 9], тоді як у комп'ютерних науках сформовано напрям «зеленого ШІ» (Green AI), що вимагає звітування та зменшення вуглецевого сліду моделей [5]. Отже, вже запропоновані класифікаційні виміри є необхідною основою [4], однак для практично значущого порівняння інструментів в архітектурних і муніципальних сценаріях бракує системного шару оцінювання відповідальності та сталості, який давав би змогу зіставляти інструменти не лише за технічною результативністю, але й за етичними, управлінськими, екологічними та соціальними наслідками їхнього застосування.

Практичну нагальність оцінювання архітектурно-урбаністичних ШІ-інструментів у вимірі відповідальності та сталості демонструють міжнародні приклади з професійної практики, де користь технології не гарантує суспільного визнання та довготривалого впровадження. Так, у Нью-Йорку впровадження міських цифрових кіосків LinkNYC супроводжувалося конфліктами щодо приватності, контролю даних і правил користування публічним простором, що показало, як інфраструктурні цифрові сервіси можуть набувати ознак спостереження та викликати суспільний опір [10]. У Чикаго проєкт міського сенсорного моніторингу Array of Things потребував спеціальних правил захисту приватності, механізмів участі громади та процедур управління даними, оскільки навіть логіка вимірювання міських параметрів породжує питання підзвітності та прийнятності збирання даних у місті [11]. Показовим прикладом є також нідерландський досвід Systeem Risico Indicatie (SyRI) – алгоритмічної системи виявлення ризику шахрайства у сфері соціального забезпечення, яку застосовували державні та місцеві органи, і яку було визнано незаконною через нестачу прозорості та належних механізмів підзвітності [12; 13]. У Великобританії судові рішення у справі Bridges щодо автоматизованого розпізнавання облич підкреслило, що без чітких правових підстав, оцінювання ризиків, контролів і перевірюваних процедур навіть технологічно ефективні системи стають неприйнятними для використання в публічному просторі [14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Стрімке впровадження інструментів штучного інтелекту (ШІ) в архітектурі та будівництві зумовило появу численних підходів до їхньої систематизації, покликаних пояснити роль, технічні характеристики та сценарії застосування різних рішень [2]. У наукових публікаціях простежується прагнення впорядковувати інструментарій ШІ за різними ознаками, від типу завдання та кінцевого продукту до характеру даних і обчислювальних методів, а також за етапами проєктної реалізації. Такі спроби створюють необхідну базу для розуміння «ландшафту» інструментів і формують підґрунтя для порівняння рішень у практиці архітектурного проєктування. Водночас для професійної діяльності, а особливо для муніципальних та інфраструктурних сценаріїв, цього виявляється недостатньо: навіть за наявності опису призначення та технічних параметрів інструмента часто залишається невизначеним, наскільки він є відповідальним і сталим у застосуванні, тобто чи відповідає вимогам етики, підзвітності, управління даними, ресурсної ефективності та соціальної корисності.

Джерельну базу також складають рецензовані оглядові і теоретичні праці, де продемонстровано, що для архітектури, інженерії та будівництва (АЕС) етика й сталість застосування ШІ не можуть розглядатися як додаткові міркування після вибору інструмента, а мають бути включені до критеріїв аналізу вже на етапі порівняння рішень. Зокрема, систематичні огляди з етики ШІ та роботизації в АЕС узагальнюють типові групи ризиків, прозорість і пояснюваність, розподіл відповідальності та підзвітність, приватність і управління даними, безпека, упередження та справедливність, а також наслідки для трудових практик і професійної автономії [15]. У цьому сенсі академічні огляди підтверджують потребу в такому оцінювальному шарі, який дає змогу зіставляти інструменти не лише за функцією та алгоритмікою, але й за відтворюваними нормативними критеріями прийнятності та суспільної користі.

В урбаністичному контексті аналогічні положення простежуються в дослідженнях алгоритмічного планування та управління «розумним містом» (Smart city). Систематичні огляди з алгоритмічного урбаністичного планування для розумного та сталого розвитку показують, що висока ефективність даних і моделей не усуває проблем якості даних і реальної участі зацікавлених сторін в ухваленні рішень [16]. Водночас оглядові праці з етики застосування ШІ в міському плануванні

акцентують увагу на ризиках упереджень, порушенні приватності та втрати довіри до планувальних процедур [17]. Додатково, нові систематичні огляди впровадження ШІ в урбаністичне врядування фіксують розрив між теоретичними обіцянками і практичним вбудовуванням ШІ в управлінські рамки, акцентуючи на вимогах прозорості, справедливості та суспільного контролю [18]. Теоретичні підходи до управління міськими цифровими технологіями, зокрема з позицій захисту прав людини, пропонують розуміти відповідальність як вимогу, що має бути закріплена в правилах і процедурах роботи систем та врахована під час їхнього проєктування. Це охоплює оцінювання ризиків, прозорі способи залучення громадськості до рішень і нагляд за використанням таких технологій [19]. Сукупно ці праці розширюють академічну основу теми та обґрунтовують доцільність інтеграції відповідальності й сталості як окремого критеріального виміру в аналізі інструментів ШІ для архітектурних і міських сценаріїв.

Окремі дослідження вже фіксують етичні ризики та потребу в нагляді для певних класів інструментів, зокрема в генеративному проєктуванні [3; 20], а також показують, що урбаністичні ШІ-системи можуть забезпечувати відчутні операційні покращення, наприклад, оптимізацію транспортних потоків у платформі «City Brain» і водночас виявляти прогалини у приватності та управлінні даними [6]. Однак такі міркування залишаються фрагментарними й не оформлені в уніфіковану схему, придатну для послідовного порівняння різних інструментів у межах єдиної логіки оцінювання. Відтак актуальним науковим і практичним завданням є формалізація виміру відповідальності та сталості як оцінювального шару багатовимірної класифікації, що забезпечить обґрунтований вибір, інтеграцію та управління ШІ-інструментами в архітектурних і муніципальних проєктах з урахуванням етичних, управлінських, екологічних і соціальних наслідків їхнього застосування.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення та перевірка на практиці відповідально-сталого виміру класифікації архітектурних ШІ-інструментів, що дає змогу системно впорядкувати їх за визначеними параметрами. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– проаналізувати наявні підходи до систематизації ШІ-інструментів в архітектурі та підходи до етики, управління й сталості їхнього застосування;

– обґрунтувати структуру відповідально-сталого виміру та виконати порівняльне оцінювання добірки інструментів різних типів на основі публічної документації та відкритих описів практичного застосування;

– узагальнити результати профілювання й окреслити характерні відмінності і компроміси між параметрами структури виміру;

– визначити обмеження запропонованого підходу та напрями подальшого уточнення шкал і процедур оцінювання.

Виклад основного матеріалу. Незважаючи на широку варіативність інструментів, керованих ШІ, від раннього генеративного проектування до підтримки будівництва та експлуатації об'єктів, значна частина таких сервісів і далі функціонує як «точкові» рішення для окремих завдань або фрагментів життєвого циклу. Брак інтеграції та узгодженого системного бачення знижує можливість повноцінно реалізувати потенціал ШІ в архітектурі й ускладнює розуміння того, як різні рішення вбудовуються в робочі проектні процеси та практики управління інформацією. У результаті впровадження часто набуває ситуативного характеру, а не перетворюється на стратегічне розгортання. Це актуалізує потребу комплексної класифікації ШІ-інструментів із розкриттям ключових аспектів їхнього застосування.

Для відповіді на цю потребу запропоновано класифікацію ШІ-інструментів в архітектурі, побудовану на сукупності чотирьох взаємодоповнювальних вимірів, кожен з яких задає власні критерії впорядкування інструментарію. *Функціонально-результативний* вимір описує інструменти через роль у проектній діяльності та тип сформованого результату. *Інформаційно-алгоритмічний* вимір групує інструменти за даними, з якими вони працюють, і підходами/методами, що забезпечують оброблення цих даних. *Процесно-цикловий* вимір співвідносить інструменти з етапами проекту та характером їхньої інтеграції в робочі процеси. *Відповідально-сталий* вимір фіксує вимоги до етичності й безпеки застосування, нормативної відповідності, а також ресурсної та екологічної ефективності, тобто додає оцінювальну перспективу до суто функціональних, технічних і процесних характеристик.

Поєднане використання цих вимірів дає змогу розмістити кожен ШІ-інструмент у багатовимірному класифікаційному просторі та виконувати зіставлення одночасно з технічних, функціональних і процесних позицій, з урахуванням

відповідальності та сталого розвитку. У цій статті деталізовано відповідально-сталий вимір, що задає критерії оцінювання етичної керованості, нормативно-організаційної підзвітності та екологічно-соціальних наслідків застосування ШІ в архітектурі й урбаністиці.

Термін «відповідально-сталий» позначає класифікаційний вимір, у якому інструмент на основі штучного інтелекту (ШІ) оцінюється не лише за тим, *що* він робить у проектній діяльності, а й за тим, *наскільки* відповідально і стало він застосовується та які наслідки має для людей, міста й довкілля. У практиках архітектури й міського планування це питання загострюється тим, що ШІ дедалі частіше впливає на рішення, пов'язані з безпекою, доступністю, розподілом ресурсів і управлінням міськими даними.

Змістово цей вимір є об'єднанням двох напрямів: відповідальності (Responsible) та сталості (Sustainable). Відповідальність охоплює етичність застосування, людський контроль і управлінсько-нормативні механізми, що не дають змоги розмити підзвітність між користувачем і постачальником технології [3]. Сталість, своєю чергою, доцільно оцінювати у двох площинах: скільки ресурсів споживає сам ШІ під час навчання та роботи, тобто енерговитрати й пов'язані з ними викиди, і яких змін він реально досягає під час застосування в проектах і управлінських рішеннях, тобто який має екологічний та соціально-міський ефект [5; 20]. Такий поділ принципово важливий, оскільки інструмент може давати «сталий» дизайн-ефект у проекті, але робити це ціною непропорційно високих обчислювальних витрат, або навпаки, бути енергоефективним як сервіс, але не приносити вимірюваних позитивних змін для якості середовища.

В розрізі відповідально-сталого виміру доцільно виокремити чотири параметри: етика та людський нагляд (R1), управління й нормативна відповідність (R2), екологічна результативність ШІ, його обчислювальна сталість (S1), та соціально-міська сталість результатів застосування (S2), і для кожного задати категорії оцінювання у вигляді 0–5 шкали рівня розвитку. Критерії оцінювання параметрів R1–R2–S1–S2 подано як перевірені ознаки, що мають підтверджуватися доступними матеріалами (публічною документацією, політикою роботи з даними, звітами, незалежними оглядами, пілотними впровадженнями). Шкала 0–5 є порядковою і відображає рівень розвитку: відсутність або мінімальна визначеність механізмів

(0–1); наявність базових процедур і часткова прозорість (2–3); системне, документоване та перевірене впровадження (4–5). Для R1 вищі рівні передбачають наявність реального людського нагляду, зрозумілих обмежень і керованості результатів; для R2 – це фіксовані правила відповідальності, керування даними й ризиками та підтверджені організаційні контролю; в розрізі S1 – це наявність даних або обґрунтованих оцінок ресурсних витрат і заходів з їх зменшення; для S2 – опис ефектів через загальноприйняті індикатори та наявність вимірюваних підтверджень у практиці.

У цьому дослідженні параметр R1 відображає ступінь збереження професійного контролю та можливості втручання людини під час отримання й використання результатів інструмента. У контексті архітектури відповідальний ШІ означає, що система підсилює, а не витісняє професійне рішення, а людина зберігає можливість втручання і скасування автоматизованих пропозицій [3]. Ключовим кількісним показником тут може бути частка «людина-в-контурі» (human-in-the-loop, HITL), тобто який відсоток важливих результатів або рішень, сформованих ШІ, обов'язково перевіряє й затверджує людина, наприклад, архітектор або інший експерт.

Важливою складовою цього параметра також є пояснюваність і прозорість: наявність інтерпретованих пояснень, візуалізацій впливу параметрів, документації обмежень і сценаріїв помилок, що підвищує керованість та довіру, а отже підтримує людський контроль [21]. Граничні рівні розвитку цього параметра можна окреслити так: 0, коли інструмент застосовується у високоризикових завданнях без реального людського нагляду або є задокументовані етичні порушення; та 5, коли майже всі значущі рішення проходять обов'язкове підтвердження людиною, а сам інструмент надає прозорі підстави для такого рішення, пояснення, зрозумілі аргументи, і має задекларовані та/або впроваджені механізми зниження упередженості [3].

Параметр R2 узагальнює наявність формалізованих правил відповідальності, керування даними й ризиками та підтверджуваних організаційних контролів відповідності. До цього параметра також належить відповідність актуальним регуляціям і стандартам, наприклад, вимогам приватності General Data Protection Regulation (GDPR) або управлінським підходам, сформульованим у стандартах International Organization for Standardization / International Electrotechnical

Commission (ISO/IEC), зокрема в документах, що визначають терміни, ризики та системи менеджменту ШІ [2; 7].

У прикладному вимірі цей параметр доцільно оцінювати через перевірювані свідчення, які можна підтвердити документами, наявність сертифікацій з інформаційної безпеки та контролів, звітів типу Service Organization Control 2 (SOC 2) для хмарних сервісів, процедур повідомлення про інциденти, а також формалізованих оцінок впливу і ризиків, зокрема для автоматизованих систем у публічному секторі [22]. Вищі рівні розвитку (4–5) притаманні інструментам, в яких управління є прозорим і системним, процеси проходять аудит, діють механізми контролю якості, забезпечено простежуваність результатів, а ролі та відповідальність чітко розподілені. Нижчі рівні (0–3) зазвичай означають, що джерела даних і правила використання непрозорі, також можливі збої в управлінні.

Параметр S1 характеризує ресурсний слід обчислень і наявність підтверджених заходів для його зменшення або прозорого звітування. На рівні комп'ютерних наук дедалі більше досліджень показують, що навчання великих моделей може супроводжуватися дуже значними викидами CO₂e [5; 23], навіть щоденне використання може споживати більше енергії, ніж традиційні програмні запити [23]. Саме тому підхід Green AI зосереджено на тому, що ефективність і енерговитрати мають стати обов'язковими показниками звітування та порівняння [5]. Таким чином, практичне вимірювання цього параметра може спиратися на означені дані, в разі їхньої публікації постачальником. За відсутності даних використовуються проксі-оцінки з літератури та обґрунтовані припущення за класом алгоритмів, так правилів системи та невеликі моделі зазвичай мають значно кращі значення екологічної результативності, ніж великі генеративні або базові моделі [24; 25]. Вищий рівень розвитку цього параметра (5) означає не тільки низький слід, але й прозоре публічне звітування та цілеспрямовану оптимізацію обчислень відповідно до підходів Green AI [5].

Параметр S2 оцінює не декларативну користь інструмента, а ступінь узгодженості заявлених/досягнутих ефектів із усталеними системами індикаторів сталого розвитку. Як базові орієнтири використовуються: Global Indicator Framework Цілей сталого розвитку ООН (SDG) [26], стандартизовані міські індикатори ISO 37120/ISO 37122

[27] та KPI для smart sustainable cities ITU-T Y.4903 [28]. Оцінювання S2 будується як послідовна перевірка того, наскільки заявлений результат справді можна вважати сталим і підтвердженим. Спочатку з'ясовується, чи описано очікуваний ефект, через загальновизнані показники, а не загальні формулювання. Далі перевіряється, чи підкріплено цей ефект вимірюваними даними: результатами пілотного впровадження, звітами або незалежними оцінками. І насамкінець уточнюється, чи враховано вимоги сталості не лише в описі, але й у самому методі, тобто чи закладено їх безпосередньо в алгоритм як цілі, обмеження або правила оптимізації.

Для міських систем керування трафіком заявлені покращення мобільності розглядаються через відповідні індикатори міської результативності (ISO 37120/37122; ITU-T Y.4903) і можуть інтерпретуватися як внесок у кліматично-екологічні цілі лише за наявності верифікованих метрик, наприклад, зміна середнього часу поїздки/затримки, стабільності потоків, похідні оцінки паливоспоживання за усталеною методикою. Водночас саме такі рішення часто загострюють питання приватності, підзвітності та управління даними, тому їхні позитивні результати за параметром S2 не мають перекривати слабкий рівень розвитку R1–R2, так соціально корисний ефект не знімає потреби в етичному контролі й належному врядуванні [20]. Вищі рівні розвитку цього параметра (4–5) притаманні інструментам, для яких підтримка сталих рішень є прямою метою. Нижчі рівні (0–3) описують системи, що майже не впливають на сталість у практиці або можуть опосередковано спонукати до нестійких сценаріїв розвитку, наприклад, коли оптимізуються вузькі показники без урахування екологічних і соціальних наслідків.

Емпіричну перевірку запропонованого підходу виконано як пілотний порівняльний аналіз добірки інструментів різних типів, наприклад, підтримка проєктування, енергоефективність, перевірка нормативів, міське моделювання та аналітика, для яких доступні відкриті матеріали про принципи роботи, використання даних і заявлені ефекти. Для кожного інструмента зіставлено дані з публічної документації розробника, умов використання, політики роботи з даними, опису функцій і обмежень, наявності незалежних перевірок або сертифікацій та з відкритих описів практичного застосування. Далі інструменти оцінено за параметрами R1–R2–S1–S2 та шкалою 0–5: високі

значення надавалися лише за наявності чітких описів механізмів і перевірених підтверджень, тоді як за браком доказів оцінювання обмежувалося нижчими рівнями. Узагальнені результати подано в Таблиці 1.

Порівняння в Таблиці 1 виявляє кілька стійких відмінностей між типами інструментів. Професійні засоби підтримки проєктування та консультування частіше мають вищі значення R1, оскільки зберігають провідну роль фахівця в постановці завдання та інтерпретації результатів. Інструменти міського масштабу можуть демонструвати високий потенціал соціально-міської сталості (S2), але водночас загострюють ризики приватності й керованості даними, що знижує рівні R1–R2. Рішення, орієнтовані на відкриті дані та суспільну користь, зазвичай сильніші за S2, проте можуть потребувати окремої уваги до S1 через ресурсомісткі обчислення. Апробація має пілотний характер і спирається на доступні відкриті описи, тому результати слугують для прозорого зіставлення інструментів і виявлення зон ризику, а не для вичерпної оцінки.

Як перший приклад можна навести Forma (Spacemaker) – хмарний програмний комплекс – від компанії Autodesk як інструмент генеративного проєктування для аналізу ділянки та ранніх стадій містобудівних рішень, що застосовує штучний інтелект (ШІ) для генерування й оцінювання варіантів забудови за критеріями інсоляції, вітрового режиму та шумового навантаження [1]. У площині параметра R1 (етика та людський нагляд) його використання зазвичай передбачає активну участь фахівця, коли проєктант задає критерії й інтерпретує результати, а отже ключові рішення залишаються під людським контролем. Для параметра R2 (управління та нормативна відповідність) важливо, хто саме розробляє та підтримує ШІ-інструмент і наскільки прозоро описані правила його використання, якщо продукт стоїть за великою компанією й має доступну публічну документацію, зазвичай можна очікувати чіткіших процедур підзвітності та політик роботи з даними. Водночас фактична наявність і рівень формалізованих сертифікацій можуть відрізнитися залежно від конкретної конфігурації сервісу та умов його надання [1]. У параметрі S1 (обчислювальна сталість) хмарний характер і сценарії масового перебору варіантів потенційно збільшують енерговитрати на ітерації, водночас це може компенсуватися оптимізаціями обчислень на стороні платформи. За параметром S2

Таблиця 1

Приклади ШІ-інструментів у розрізі відповідально-сталого виміру.

ШІ-інструмент	R1. Етика та людський нагляд	R2. Управління та нормативна відповідність	S1. Обчислювальна сталість	S2. Соціально-міська сталість результатів	Обґрунтування
Autodesk Forma (Spacemaker)	4–5	3–4	3–4	4–5	Проектант керує вибором; оптимізація контексту/якості середовища.
Cove.tool	4–5	2–3	4	4–5	Підтримка рішень для енергоефективності; «керовані» обчислення.
Code Comply.AI	4–5	4	3–4	3–4	Рішення підтверджує фахівець; заявлено SOC 2.
Aino.ai	4–5	2–3	4–5	3	Аналітичний помічник; сталість залежить від сценарію використання.
Alibaba CityBrain	≈0–2	≈1–2	≈2–3	4–5	Ефекти мобільності/екології, але ризики приватності й управління даними.
UpCodes Copilot	4–5	3	4	2–3	Консультаційні відповіді з посиланнями.
UrbanSim	4–5	3–4	3–4	4–5	Сценарне моделювання з потребою простежуваності даних, орієнтація на сталий розвиток.
Microsoft Building Footprints	3–4	4	2–3	5	Висока суспільна користь відкритих шарів; комп'ютерний зір може бути ресурсомістким.

(соціально-міська сталість) інструмент безпосередньо орієнтований на підвищення якості середовища через оптимізацію умов ділянки (світло, вітер, шум), що робить його типовим прикладом ШІ, який «вбудовує» сталі критерії у ранні проєктні рішення [1].

Другим прикладом є хмарна платформа ранньостадійного аналізу та оптимізації характеристик будівель Cove.tool, що автоматизує оцінювання проєктних альтернатив [29]. У частині R1 інструмент, зазвичай, працює як аналітичний «помічник», а результати симуляцій/оцінок потребують професійної інтерпретації та верифікації, тому людський нагляд є процедурно необхідним [29]. Для R2 ключовим є те, наскільки прозоро описано моделі, припущення, роботу з проєктними даними та межі відповідальності сервісу, саме ці елементи формують управлінсько-нормативний шар навколо застосування. За S1 хмарне

виконання означає наявність обчислювального сліду, але у порівнянні з великими генеративними моделями подібні інженерні розрахункові цикли часто є більш передбачуваними та потенційно оптимізованими, особливо якщо платформа використовує прискорені розрахункові схеми. В контексті S2 ШІ-інструмент прямо пов'язаний із практиками сталого проєктування, оскільки підтримує ухвалення рішень щодо енергоефективності і якості світлового середовища на ранніх етапах, коли вплив на кінцеві показники є максимальним [29].

Наступним прикладом є інструмент автоматизованої перевірки відповідності будівельним нормам CodeComply.AI, що використовує обробку природної мови (Natural language processing, NLP) та комп'ютерний зір (Computer vision) для аналізу планів і виявлення потенційних невідповідностей вимогам норм [22]. У площині R1 такі

інструменти зазвичай функціонують як засоби підтримки фахового вибору, система генерує підказки та маркери ризику, тоді як фінальне підтвердження й відповідальне впровадження виконують кваліфіковані спеціалісти [22]. Для R2 суттєвою ознакою є акцент на організаційних контролях і довірі до сервісу, зокрема наявність згадок про Service Organization Control 2 (SOC 2) та інші практики безпеки/керування даними, що є перевірваними маркерами управлінської якості для хмарних продуктів. За S1 обчислювальні витрати визначаються масштабом перевірки та складністю моделей, однак типові завдання аналізу документів і креслень зазвичай потребують менше затрат енергії, ніж ресурсомісні генеративні підходи. У розрізі S2 потенційний внесок виявляється через підвищення якості та швидкості контролю норм, що опосередковано підтримує соціальні компоненти сталості, зокрема безпеку, доступність, правову визначеність у проєктах [22].

Aino.ai (Location analysis) є інструментом, що поєднує геоінформаційні системи (Geographic Information Systems, GIS) із ШІ-інтерфейсом запитів природною мовою та швидким формуванням аналітичних карт [30]. У параметрі R1 важливо, що інструмент не ухвалює «обов'язкових» рішень, а радше прискорює доступ до даних і їхню візуалізацію, отже, етичні ризики концентруються не стільки в автоматизації рішень, скільки у коректності інтерпретації карт, джерел даних і припущень користувача. Для R2 ключовими є алгоритми роботи з геоданими, умови використання та механізми простежуваності, що визначають керованість ризиків у професійних сценаріях [30]. У контексті S1 подібні GIS-запити та генерація карт зазвичай є помірно ресурсомісткими, порівняно з великими генеративними моделями, але масштабованість залежить від обсягів шарів і частоти запитів. За S2 інструмент має характер «платформи-посередника», він може суттєво підтримувати сталі рішення, наприклад, аналіз доступності, зелених зон, ризиків, але сам собою не гарантує сталого результату, його внесок визначається тим, які критерії сталості закладає користувач у аналіз [30].

Міська платформа управління мобільністю Alibaba CityBrain застосовує ШІ до потоків міських даних, зокрема даних камер трафіку та GPS для оптимізації транспортних потоків, керування світлофорними фазами та виявлення інцидентів [6]. У R1 проблематика посилюється масштабом і режимом роботи, якщо система впливає на

міські процеси майже в реальному часі, постає питання, наскільки людина реально залишається «в контурі» ухвалення критичних рішень і чи є механізми зрозумілого втручання/скасування дій системи. В розрізі параметра R2 домінують питання управління даними, прозорості й підзвітності, навіть за наявності інституційного замовника інструмент може створювати напруженість між ефективністю та вимогами приватності/керуваності даних, що є типовим викликом для великих міських ШІ-систем [6]. За S1 обчислювальний слід потенційно суттєвий через безперервну обробку поточкових даних та масштаб інфраструктури. Натомість за S2 подібні системи часто демонструють значущі міські ефекти, зменшення заторів, опосередковане скорочення викидів, виграє час, тобто можуть мати високий потенціал соціально-міської сталості, але саме тому їх не можна оцінювати лише за «користю», ігноруючи параметри R1–R2 [6; 20].

Спеціалізований асистент для архітектурної діяльності UpCodes Copilot використовує велику мовну модель (Large language model, LLM) на базі класу Generative Pre-trained Transformer 4 (GPT-4) для відповідей на запитання щодо будівельних норм із наведенням посилань [21]. У R1 перевагою є інтерактивний режим, коли користувач формулює запит, отримує відповідь і сам ухвалює рішення, що структурно підсилює людський нагляд, порівняно з автономними системами. Водночас етичний фокус зміщується на коректність інтерпретації норм, ризики помилкових узагальнень і потребу в професійній перевірці відповіді перед застосуванням у проєкті. Для R2 визначальними стають політика роботи з текстами норм, джерелами і захистом даних користувача, адже саме ці елементи задають рівень керованості правових і професійних ризиків [21]. У контексті S1 LLM-асистенти мають ненульовий обчислювальний слід на запит, але за одиницю операції він може бути меншим, ніж у важких генеративних графічних контурах, оцінка залежить від частоти використання і моделі сервісу. За S2 внесок переважно опосередкований, оскільки інструмент хоч і підвищує якість і швидкість роботи з нормами, що може підтримувати безпечніші та нормативно коректні рішення, але прямі сталі ефекти залежать від того, як саме через норми забезпечуються енергоефективність, доступність та інші соціальні критерії [21].

UrbanSim є платформою моделювання та підтримки міських рішень, що застосовується для

симуляції сценаріїв землекористування, житла і транспорту та поступово інтегрує підходи ШІ/машинного навчання (Machine learning, ML) для прогнозування наслідків управлінських рішень [31]. У розрізі параметра R1 інструмент зазвичай використовується як аналітична система підтримки планування, користувачі задають сценарії, припущення та інтерпретують результати, а отже ключові рішення формуються у полі професійної та публічної відповідальності. Для R2 принциповими є перевірюваність і простежуваність, тобто має бути зрозуміло, які припущення закладено, що саме змінено в сценарії та які дані використано для отримання результатів. Оскільки рішення щодо міського розвитку мають значний суспільний вплив, вони потребують прозорого документування розрахунків і чіткої підзвітності. В межах параметра S1 обсяг обчислень залежить від того, наскільки масштабні сценарії запускаються і наскільки складні моделі використовуються. Водночас типові симуляційні цикли зазвичай легше планувати й контролювати, за часом і навантаженням, ніж роботу великих генеративних моделей, для яких витрати можуть сильніше коливатися. За S2 платформа безпосередньо пов'язана зі сталим міським розвитком, адже її основне призначення полягає у порівнянні варіантів управлінських рішень й оцінюванні їхніх наслідків. У матеріалах UrbanSim вона подається як інструмент підтримки сталого планування, тому може розглядатися як один з найбільш показових прикладів високої орієнтації на соціально-міську сталість результатів [31].

У відкритому проєкті Microsoft Building Footprints комп'ютерний зір на основі глибоких нейронних мереж застосовано до аерофотознімків для автоматичного виділення контурів будівель і публікації результатів як відкритих даних [32]. У параметрі R1 ключовим стає питання прозорості й коректності, навіть якщо дані публікуються як «допоміжні», помилки сегментації можуть впливати на планувальні/аналітичні висновки, тому потрібні процедури перевірки точності та відповідального використання шарів у рішеннях. Для R2 вагомою є саме практика відкритої публікації та документування наборів даних, умови доступу, версія, опис методів, що підвищує підзвітність і відтворюваність використання [32]. У площині S1 навчання та застосування моделей комп'ютерного зору на великих масивах зображень справді потребує значних обчислень, особливо під час створення

глобального покриття. Водночас подальше багаторазове використання вже сформованих відкритих шарів різними організаціями може зменшувати сукупні витрати, замість того, щоб кожна структура окремо виконувала паралельне ручне оцифрування або повторно запускала подібні процеси, вона спирається на спільний базовий набір даних. За параметром S2 суспільно-міський ефект зазвичай дуже високий, оскільки відкриті цифрові контури будівель стають базовим ресурсом для планування, реагування на надзвичайні ситуації та досліджень міського розвитку, тобто масштабно підсилюють спроможність міст і спільнот працювати з даними про забудову [32].

Висновки і перспективи використання результатів дослідження. У статті обґрунтовано відповідально-сталий вимір класифікації архітектурних ШІ-інструментів і запропоновано профіль R1–R2–S1–S2 на шкалі 0–5 як спосіб порівняння не лише функцій, але й етичних, управлінських та сталих наслідків застосування. Пілотне порівняльне профілювання за відкритою документацією (Таблиця 1) виявило повторювані відмінності між типами інструментів і показало, що високі значення окремих параметрів можуть супроводжуватися ослабленням інших, формуючи практично значущі компроміси. Зокрема, інструменти підтримки проєктування та консультування частіше демонструють вищий R1 завдяки збереженню ролі фахівця, тоді як системи міського масштабу можуть мати високий S2 за нижчих R1–R2, а S1 суттєво відрізняється залежно від класу моделей і режимів використання. Отримані результати підтверджують, що оцінювання інструментів за одним показником є недостатнім; натомість профіль R1–R2–S1–S2 може слугувати прозорою основою для зіставлення альтернатив і формування вимог до впровадження з урахуванням підзвітності, керованості, ресурсної ефективності та очікуваних результатів, описаних через усталені індикатори сталого розвитку.

Основна новизна отриманих результатів полягає передусім у їхній системній адаптації до архітектурно-урбаністичного контексту, що перетворює загальні міжнародні підходи до відповідального та екологічно доцільного застосування штучного інтелекту на придатний для професійної практики інструментарій оцінювання і порівняння. У комбінації з іншими вимірами багатовимірної класифікації, функціонально-результативним, інформаційно-алгоритмічним

і процесно-цикловим, такий підхід підтримує рішення щодо інтеграції ШІ на основі доцільних критеріїв, а не ситуативних переваг.

Обмеження запропонованого підходу зумовлені тим, що оцінювання параметрів R1–R2–S1–S2 у межах апробації спирається переважно на відкриті описи, публічну документацію та доступні свідчення про практичне застосування, тому повнота й точність профілю залежать від рівня прозорості конкретного інструмента. Шкала 0–5 має порядковий характер і відображає рівні розвитку за наявними ознаками, а межі між рівнями потребують подальшого калібрування та перевірки узгодженості оцінювання між різними експертами. Для частини інструментів дані щодо обчислювальної сталості (S1) можуть бути неповними, через що використовуються наближені оцінки за класом методів і режимом використання. Оцінювання соціально-міської сталості

результатів (S2) залежить від конкретних умов застосування: той самий інструмент може давати різний ефект залежно від поставленого завдання, якості і складу даних, а також правил та способу впровадження в організації. Тому отримані профілі варто трактувати як підставу для порівняння інструментів і виявлення потенційних ризиків, а не як універсальну остаточну оцінку.

Подальші дослідження варто спрямувати на уточнення шкал рівня розвитку для R1–R2–S1–S2, розширення набору прикладів і верифікацію оцінювання через накопичення відтворюваних метрик впливу.

Перспективи застосування результатів полягають у тому, що профіль R1–R2–S1–S2 може слугувати основою для порівняння альтернатив під час закупівель, підготовки технічних вимог і оцінювання придатності ШІ-інструментів у проектних та міських сценаріях.

Список використаних джерел

1. Harrouk C. *Spacemaker proposes AI-powered generative design to create more sustainable spaces and cities*. *ArchDaily*. 2020. URL: <https://www.archdaily.com/952850/spacemaker-proposes-ai-powered-generative-design-to-create-more-sustainable-spaces-and-cities> (дата звернення: 15 лютого 2026).
2. *AI in urban planning*. *Meegle*. 2025. URL: https://www.meegle.com/en_us/topics/machine-learning/ai-in-urban-planning (дата звернення: 16 лютого 2026).
3. Sunil N. The ethics of AI in architecture: Balancing automation and human intent. *ParametricArchitecture*. 2024. URL: <https://parametric-architecture.com/the-ethics-of-ai-in-architecture/> (дата звернення: 15 лютого 2026).
4. Вергунова Н. С. Класифікація інструментарію штучного інтелекту в архітектурі. Функціонально-результативний вимір. *Комунальне господарство міст*. Серія: «Інформаційні технології та інженерія». 2025. № 6 (194). С. 193–200. DOI: 10.33042/3083-6727-2025-6-194-193-200
5. Schwartz R., Dodge J., Smith N. A., Etzioni O. Green AI. *arXiv*. 2019. P. 1–12. DOI: 10.48550/arXiv.1907.10597
6. Beall A. *In China, Alibaba's data-hungry AI is controlling (and watching) cities*. *WIRED*. 2018. URL: <https://www.wired.com/story/alibaba-city-brain-artificial-intelligence-china-kuala-lumpur/> (дата звернення: 14 лютого 2026).
7. *UNESCO's Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence: Key facts*. *UNESCO*. 2023. URL: https://unesco.org.uk/site/assets/files/14137/unesco_recommendation_on_the_ethics_of_artificial_intelligence_-_key_facts.pdf (дата звернення: 16 лютого 2026).
8. Para E. *The UNESCO Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*. *Soroptimist International*. 2024. URL: <https://www.soroptimistinternational.org/2024/07/18/the-unesco-recommendation-on-the-ethics-of-artificial-intelligence/> (дата звернення: 14 лютого 2026).
9. Edmunds R. Why AI adoption remains a work in progress. *AIA Community Hub*. 2025. URL: <https://communityhub.aia.org/blogs/rebecca-w-edmunds-aia/2025/10/30/why-ai-adoption-remains-a-work-in-progress> (дата звернення: 15 лютого 2026).
10. Amsellem A. The noise of silent machines: A case study of LinkNYC. *Surveillance & Society*. 2021. № 19 (2), P. 168–186. DOI: 10.24908/ss.v19i2.14302
11. Catlett C. E., Beckman P. H., Sankaran R., Galvin K. K. Array of things: A scientific research instrument in the public way: Platform design and early lessons learned. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Science of Smart City Operations and Platforms Engineering (SCOPE '17)*. 2017. pp. 26–33. Association for Computing Machinery. DOI: 10.1145/3063386.3063771
12. van Bekkum M., Zuiderveen Borgesius F. Digital welfare fraud detection and the Dutch SyRI judgment. *European Journal of Social Security*. 2021. № 23 (4), P. 323–340. DOI: 10.1177/13882627211031257
13. Wieringa M. “Hey SyRI, tell me about algorithmic accountability”: Lessons from a landmark case. *Data & Policy*. 2023. № 5. DOI: 10.1017/dap.2022.39
14. Purshouse J., Campbell L. Automated facial recognition and policing: A Bridge too far? *Legal Studies*. 2022. № 42 (2), P. 209–227. DOI: 10.1017/lst.2021.22
15. Liang K., Li M., Zhang, J., Zhang X. Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry. *Automation in Construction*. 2024. № 162, 105369. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105369
16. Son H., Kim C., Kim C. Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*. 2023. № 94, 104562. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104562

17. Sanchez T. W., Brenman M., Ye X. The Ethical Concerns of Artificial Intelligence in Urban Planning. *Journal of the American Planning Association*. 2025. № 91 (2), P. 294–307. DOI: 10.1080/01944363.2024.2355305
18. Lartey, D., & Law, K. M. Y. Artificial intelligence adoption in urban planning governance: A systematic review of advancements in decision-making, and policy making. *Landscape and Urban Planning*. 2025). № 258, 105337. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2025.105337
19. Wernick A., Artyushina A. Future-proofing the city: A human rights-based approach to governing algorithmic, biometric and smart city technologies. *Internet Policy Review*. 2023. № 12 (1). DOI: 10.14763/2023.1.1695
20. Avagyan A. *AI-integrated smart traffic systems for carbon-neutral cities*. *TRENDS Research & Advisory*. 2025. URL: <https://trendsresearch.org/insight/ai-integrated-smart-traffic-systems-for-carbon-neutral-cities/> (дата звернення: 15 лютого 2026).
21. Shu C. *UpCodes launches Copilot, an AI-based research assistant for building codes*. *TechCrunch*. 2023. URL: <https://techcrunch.com/2023/05/30/upcodes-copilot-series-a/> (дата звернення: 15 лютого 2026).
22. Our SOC 2 audit and report. *CodeComply.AI*. URL: <https://codecomply.ai/#:~:text=Our%20SOC%20%20Audit%20and,Data%20is%20Safe%20with%20Us> (дата звернення: 14 лютого 2026).
23. Zewe A. *Explained: Generative AI's environmental impact*. *MIT News*. 2025. URL: <https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117> (дата звернення: 15 лютого 2026).
24. *What is the CO2 emission per ChatGPT query?* *Smartly.AI Blog*. 2024. URL: <https://smartly.ai/blog/the-carbon-footprint-of-chatgpt-how-much-co2-does-a-query-generate> (дата звернення: 14 лютого 2026).
25. You J. How much energy does ChatGPT use? *Epoch AI (Gradient Updates)*. 2025. URL: <https://epoch.ai/gradient-updates/how-much-energy-does-chatgpt-use> (дата звернення: 13 лютого 2026).
26. United Nations Statistics Division. *SDG indicators: Official list of SDG indicators*. *SDG Indicators*. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/> (дата звернення: 3 березня 2026).
27. *International Organization for Standardization. ISO 37120:2018–Sustainable cities and communities–Indicators for city services and quality of life*. 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/68498.html> (дата звернення: 3 березня 2026).
28. *Recommendation ITU-T Y.4903. Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals*. 2022. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4903-202203-I> (дата звернення: 3 березня 2026).
29. Roth A. *Cove.tool officiates perfect marriage between reduced order modeling and OpenStudio*. *Department of Energy (Buildings)*. 2021. URL: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/covetool-officiates-perfect-marriage-between-reduced-order-modeling-and> (дата звернення: 13 лютого 2026).
30. *AI tool for site analysis: No GIS or coding skills needed*. *Aino*. URL: <https://www.aino.world/> (дата звернення: 14 лютого 2026).
31. UrbanSim Inc. *Smarter Urban Development with AI*. *UrbanSim*. URL: <https://www.urbansim.com/> (дата звернення: 15 лютого 2026).
32. *Microsoft Building Footprints (ms-buildings)*. *Microsoft Planetary Computer*. URL: <https://planetarycomputer.microsoft.com/dataset/ms-buildings> (дата звернення: 15 лютого 2026).

References

1. Harrouk, C. (2020). *Spacemaker proposes AI-powered generative design to create more sustainable spaces and cities*. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/952850/spacemaker-proposes-ai-powered-generative-design-to-create-more-sustainable-spaces-and-cities> [in English].
2. *AI in urban planning*. (2025). *Meegle*. Retrieved from https://www.meegle.com/en_us/topics/machine-learning/ai-in-urban-planning [in English].
3. Sunil, N. (2024). The ethics of AI in architecture: Balancing automation and human intent. *ParametricArchitecture*. Retrieved from <https://parametric-architecture.com/the-ethics-of-ai-in-architecture/> [in English].
4. Vergunova, N. (2025). Classification of artificial intelligence tooling in architecture. The functional-resultative dimension. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering Science and Architecture*, 6(194), 193–200. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-193-200> [in Ukrainian].
5. Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2019). Green AI. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.10597> [in English].
6. Beall, A. (2018). *In China, Alibaba's data-hungry AI is controlling (and watching) cities*. *WIRED*. Retrieved from <https://www.wired.com/story/alibaba-city-brain-artificial-intelligence-china-kuala-lumpur/> [in English].
7. *UNESCO's Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence: Key facts*. (2023). *UNESCO*. Retrieved from https://unesco.org.uk/site/assets/files/14137/unesco_recommendation_on_the_ethics_of_artificial_intelligence_-_key_facts.pdf [in English].
8. Para, E. (2024). The UNESCO Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence. *Soroptimist International*. Retrieved from <https://www.soroptimistinternational.org/2024/07/18/the-unesco-recommendation-on-the-ethics-of-artificial-intelligence/> [in English].
9. Edmunds, R. W. E. (2025). *Why AI adoption remains a work in progress*. *AIA Community Hub*. Retrieved from <https://communityhub.aia.org/blogs/rebecca-w-edmunds-aia/2025/10/30/why-ai-adoption-remains-a-work-in-progress> [in English].

10. Amsellem, A. (2021). The noise of silent machines: A case study of LinkNYC. *Surveillance & Society*, 19(2), 168–186. <https://doi.org/10.24908/ss.v19i2.14302> [in English].
11. Catlett, C. E., Beckman, P. H., Sankaran, R., & Galvin, K. K. (2017). Array of things: A scientific research instrument in the public way: Platform design and early lessons learned. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Science of Smart City Operations and Platforms Engineering (SCOPE '17)* (pp. 26–33). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3063386.3063771> [in English].
12. van Bekkum, M., & Zuiderveen Borgesius, F. (2021). Digital welfare fraud detection and the Dutch SyRI judgment. *European Journal of Social Security*, 23(4), 323–340. <https://doi.org/10.1177/13882627211031257> [in English].
13. Wieringa, M. (2023). “Hey SyRI, tell me about algorithmic accountability”: Lessons from a landmark case. *Data & Policy*, 5. <https://doi.org/10.1017/dap.2022.39> [in English].
14. Purshouse, J., & Campbell, L. (2022). Automated facial recognition and policing: A Bridge too far? *Legal Studies*, 42(2), 209–227. <https://doi.org/10.1017/lst.2021.22> [in English].
15. Liang, K., Li, M., Zhang, J., & Zhang, X. (2024). Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry. *Automation in Construction*, 162, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105369> [in English].
16. Son, H., Kim, C., & Kim, C. (2023). Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, 94, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562> [in English].
17. Sanchez, T. W., Brenman, M., & Ye, X. (2025). The Ethical Concerns of Artificial Intelligence in Urban Planning. *Journal of the American Planning Association*, 91(2), 294–307. <https://doi.org/10.1080/01944363.2024.2355305> [in English].
18. Lartey, D., & Law, K. M. Y. (2025). Artificial intelligence adoption in urban planning governance: A systematic review of advancements in decision-making, and policy making. *Landscape and Urban Planning*, 258, 105337. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105337> [in English].
19. Wernick, A., & Artyushina, A. (2023). Future-proofing the city: A human rights-based approach to governing algorithmic, biometric and smart city technologies. *Internet Policy Review*, 12(1). <https://doi.org/10.14763/2023.1.1695> [in English].
20. Avagyan, A. (2025). *AI-Integrated Smart Traffic Systems for Carbon-Neutral Cities*. *TRENDS Research & Advisory*. Retrieved from <https://trendsresearch.org/insight/ai-integrated-smart-traffic-systems-for-carbon-neutral-cities/> [in English].
21. Shu, C. (2023). *UpCodes launches Copilot, an AI-based research assistant for building codes*. *TechCrunch*. Retrieved from <https://techcrunch.com/2023/05/30/upcodes-copilot-series-a/> [in English].
22. Our SOC 2 Audit and Report. *CodeComply.AI*. Retrieved from <https://codecomply.ai/#:~:text=Our%20SOC%202%20Audit%20and,Data%20is%20Safe%20with%20Us> [in English].
23. Zewe, A. (2025). *Explained: Generative AI's environmental impact*. *MIT News*. Retrieved from <https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117> [in English].
24. *What is the CO2 emission per ChatGPT query?* (2024). *Smarterly.AI*. Retrieved from <https://smarterly.ai/blog/the-carbon-footprint-of-chatgpt-how-much-co2-does-a-query-generate> [in English].
25. You, J. (2025). How much energy does ChatGPT use? *Epoch AI (Gradient Updates)*. Retrieved from <https://epoch.ai/gradient-updates/how-much-energy-does-chatgpt-use> [in English].
26. United Nations Statistics Division. *SDG indicators: Official list of SDG indicators*. *SDG Indicators*. Retrieved from <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/> [in English].
27. *International Organization for Standardization*. (2018). *ISO 37120:2018–Sustainable cities and communities–Indicators for city services and quality of life*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/68498.html> [in English].
28. *Recommendation ITU-T Y.4903*. (2022). *Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals*. Retrieved from <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4903-202203-I> [in English].
29. Roth, A. (2021). *Cove.Tool officiates perfect marriage between reduced order modeling and OpenStudio*. *Department of Energy*. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/covetool-officiates-perfect-marriage-between-reduced-order-modeling-and> [in English].
30. *AI tool for site analysis: No GIS or coding skills needed*. *Aino*. Retrieved from <https://www.aino.world/> [in English].
31. *Smarter urban development with AI*. *UrbanSim*. Retrieved from <https://www.urbansim.com/> [in English].
32. *Microsoft Building Footprints (ms-buildings)*. *Microsoft Planetary Computer*. Retrieved from <https://planetarycomputer.microsoft.com/dataset/ms-buildings> [in English].



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

Дата першого надходження статті до видання: 16.02.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 27.04.2026