

II. СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК [519.868:911.375-021.484]:332.13

JEL: R58, O18

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2025.92-93.2>

Надія АНТОНЕНКО, канд. архітектури

ORCID ID: 0000-0001-9047-3669

e-mail: antonenko.nv@knuba.edu.ua

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Дар'я МАЛЬЧИКОВА, д-р геогр. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-7197-8722

e-mail: darina1378@gmail.com

Херсонський державний університет, Херсон, Україна

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МІСЬКОЇ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ПОЛІТИКИ

Вступ. Проаналізовано концепцію міської резильєнтності як ключовий інструмент адаптивного управління в умовах багатовимірних загроз і зростаючої невизначеності. Акцент зроблено на необхідності інтеграції просторового виміру в дослідження резильєнтності, що досі залишається недостатньо опрацьованим у науковому дискурсі. Метою дослідження стала розробка методологічних засад динамічної моделі міської резильєнтності з можливістю комплексного аналізу поточного стану міської системи і модифікації складових відповідно до змін зовнішнього середовища.

Методи. Під час дослідження застосовано аналітичні методи, метод сценарного моделювання, а також міждисциплінарні підходи і моделі (метод багатокритеріального аналізу рішень та модель комплексної оцінки міської резильєнтності DPSIR).

Результати. Запропоновано динамічну модель міської резильєнтності з можливістю комплексного аналізу поточного стану міської системи і модифікації складових відповідно до змін зовнішнього середовища. Модель базується на концептах базової, актуальної та перспективної резильєнтності і математичному моделюванні різноманітних даних для створення комплексного індексу, що оцінює стійкість міської системи, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти, і оцінює здатність міських систем адаптуватися до змін і протидіяти загрозам, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти. Приклад аналізу показників просторових характеристик резильєнтності і оцінки базової просторової резильєнтності просторового шару міської системи здійснено на прикладі просторового шару "Озеленення та публічні простори".

Висновки. Розкрито, що просторові характеристики міста в контексті формування його резильєнтності визначають такі критичні аспекти, як доступність інфраструктури, ефективність евакуаційних маршрутів, швидкість мобілізації служб реагування та здатність окремих районів функціонувати автономно. Динамічне просторове моделювання дає змогу точно ідентифікувати зони ризику, адаптувати сценарії реагування до локального контексту та забезпечити цілісну оцінку міської стійкості як динамічного, багатовимірного процесу.

Ключові слова: міська резильєнтність, просторовий шар, житловий район, сталий міський розвиток, динамічна модель.

Вступ

У сучасному урбаністичному дискурсі концепція міської резильєнтності набуває дедалі більшої ваги як основа адаптивного управління містами, протидії багатовимірним загрозам і стратегічного планування в умовах зростаючої невизначеності. Міста постійно змінюються під впливом кліматичних трансформацій, геополітичної нестабільності, соціальних конфліктів, техногенних інцидентів та економічних коливань. У цих умовах резильєнтність виступає не лише як здатність до відновлення після криз (Chang, 2010), а як інструмент проактивного реагування, що передбачає зменшення смертності, зниження ризиків для здоров'я населення та уникнення масштабних економічних втрат та формує підґрунтя для еволюційного розвитку сталого міського середовища. Сучасні дослідження (Amirzadeh, Sobhaninia, & Sharifi, 2022) дедалі частіше акцентують на необхідності переосмислення підходів до вивчення міської резильєнтності, зокрема шляхом інтеграції просторових, соціальних, політичних та економічних чинників. Зростаюча складність урбаністичних систем, посилення впливу змін клімату, геополітичних та соціально-економічних криз актуалізують міждисциплінарний підхід як єдино ефективний засіб охоплення багатовимірної природи міського середовища.

Попри зростаючу увагу до теми міської резильєнтності, у науковому дискурсі досі недостатньо опрацьованим залишається просторовий вимір міської резильєнтності.

Переважаюча частина досліджень зосереджується на соціальних (Meerow, Rajouhesh, & Miller, 2019), інституційних (Connolly, 2018) чи економічних аспектах (Martin, & Sunley, 2015), тоді як просторові характеристики – такі як морфологія міста, функціонально-планувальна структура, розміщення критичної інфраструктури чи рівень та якість зелених публічних просторів – залишаються недостатньо дослідженими як характеристики резильєнтності. Велику роль у цьому відіграє потреба прогнозування в умовах невизначеності, а з іншого – особливості процесів дослідження, проектування та будівництва/реалізації нових просторових рішень – довготривалість усіх етапів процесу. При спробі скоротити будь-яку з етапів – існує ризик недооцінити певні загрози або навпаки переважати проєкт надлишковими змінними, що призводить до інформаційного "шуму" і ускладнює процес ухвалення рішень. Саме тому інструменти для оцінювання й посилення просторової міської резильєнтності мають бути переосмислені з урахуванням необхідності відкритого отримання актуальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уже сьогодні існує кілька розроблених і апробованих на міжнародному рівні метрик та індексів, призначених для комплексної діагностики стійкості міст до ризиків, включаючи кліматичні, інфраструктурні, соціальні та управлінські виклики. Ці системи слугують як інструментами моніторингу, так і основою для формування стратегій

сталого розвитку, пом'якшення наслідків надзвичайних ситуацій та підвищення адаптивного потенціалу урбанізованих територій.

Однією з найвсеохопніших і структурованих систем є City Resilience Index (CRI) (Arup, 2015; Rockefeller Foundation, n.d.), розроблений Фондом Рокфеллера у співпраці з консалтинговою компанією Arup. Індекс охоплює чотири ключові домени: здоров'я і добробут, економіка і суспільство, інфраструктура й екосистема, а також лідерство і стратегія. Кожен домен поділяється на набір індикаторів – від доступності медичної допомоги та умов проживання до стійкості інфраструктури, наявності механізмів громадської участі, якості місцевого врядування та ефективності екосистемних послуг.

Ще одним важливим інструментом є Disaster Resilience Scorecard for Cities, розроблений у межах ініціативи UNDRR (UNDRR, 2017) на основі положень Сендайської рамкової програми зі зниження ризику лих (UNDRR, 2015). Цей інструмент фокусується на управлінні ризиками стихійних лих та аналізує такі параметри, як рівень смертності, кількість постраждалих, економічні втрати, а також здатність міста до відновлення інфраструктури та надання послуг. Особливу увагу приділено наявності стратегій зниження ризиків, ефективності систем раннього запобігання та міжнародному співробітництву. Scorecard активно застосовується в містах з високою вразливістю до природних загроз, забезпечуючи гнучку, але стандартизовану платформу для оцінювання.

У рамках кліматичного моніторингу та прогнозування широко використовуються глобальні моделі оцінки кліматичних ризиків, зокрема Global Flood Risk with IMAGE Scenarios (PBL Netherlands) (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014), модель страхування від повеней компанії Fathom (Fathom, n.d.), а також платформа SEADRIF, орієнтована на Південно-Східну Азію. Ці інструменти дають змогу оцінювати зміни рівня ризику повеней з урахуванням різних кліматичних і соціально-економічних сценаріїв. Додатково використовуються глобальні бази даних – OpenStreetMap, Global Energy Observatory та gridfinder, які надають інформацію про інфраструктурну вразливість і сприяють сценарному моделюванню наслідків руйнувань.

На рівні технічного регулювання діє міжнародний стандарт ISO 37123:2019 (ISO, 2019), що містить розширений перелік показників міської стійкості. Серед них – економічна диверсифікація, енергоефективність, рівень освіченості, доступ до медичних послуг, бюджетна прозорість, механізми кліматичної адаптації тощо. ISO 37123 пропонує універсальну структуру, придатну як для розвинених, так і для тих, що розвиваються, міст, з акцентом на кількісні метрики та інституційну керуваність.

OECD Resilient Cities Framework формує концептуальну основу оцінки міської резильєнтності через призму чотирьох взаємопов'язаних складників: економічна стійкість, соціальна інклюзивність, екологічна відповідальність та якість управління (OECD, 2016). Підкреслюючи зв'язок між інвестиціями в людський капітал, цифровізацію, зменшення бідності та адаптацією до змін клімату, ця система пропонує стратегії підвищення резильєнтності як у коротко-, так і в довгостроковій перспективі. Ще одним актуальним індикатором є Global Resilient Cities Index, розроблений FM Global (FM Global, 2022). Він поєднує фізичні та макроекономічні параметри: від вразливості до кліматичних і сейсмічних ризиків до оцінки кібербезпеки, контролю за корупцією, якості логістики та рівня урбанізації. Така багатовимірність дає змогу

враховувати як природні, так і управлінські аспекти міської стійкості.

З екологічного погляду широко застосовується Environmental Performance Index (EPI), що оцінює ефективність екологічної політики міст (Yale EPI, 2022). В основу індексу покладені показники якості повітря, стійкості екосистем, рівня викидів, управління відходами та використання ресурсів. Це дозволяє трактувати резильєнтність як здатність міста підтримувати екологічну рівновагу в умовах зростання антропогенного навантаження.

Багато аспектів міської стійкості також охоплюються Цілями сталого розвитку (SDGs) (UN, 2015). Зокрема, такі цілі, як забезпечення стійких міст і спільнот, боротьба з бідністю та голодом, доступ до чистої енергії, якісної освіти та охорони здоров'я, становлять основу концепції міської резильєнтності. Ці глобальні цілі не лише орієнтують довгострокове планування, але й інтегруються у місцеві стратегічні документи та системи індикаторного моніторингу. Проте, попри розмаїття існуючих метрик міської резильєнтності, їхню комплексність та міждисциплінарність, залишається невирішеним ключовий виклик – розрив між розробкою стратегій на рівні міської політики та їхньою реалізацією у конкретних просторових рішеннях. Сучасні підходи часто обмежуються абстрактним оцінюванням стійкості, не доходючи до аналізу та трансформації фізичної структури міст.

Тому **метою дослідження** стала розробка методологічних засад динамічної моделі міської резильєнтності з можливістю комплексного аналізу поточного стану міської системи і модифікації складових відповідно до змін зовнішнього середовища. Серед ключових дослідницьких питань визначено: аналіз просторового виміру при оцінці міської резильєнтності і роль просторових параметрів в управлінні міськими трансформаціями; методологію поєднання цифрових рішень і математичних моделей формування просторової політики з метою підвищення резильєнтності міст.

Методи

Було застосовано теоретичні методи дослідження: аналіз, систематизацію і узагальнення теоретичних даних з проблеми дослідження. Для розробки динамічної моделі міської резильєнтності використано теоретичний метод сценарного моделювання. На основі сценарного моделювання розроблено і описано концепцію симуляційно-аналітичної системи для оцінки просторової резильєнтності – від базового рівня до перспективного, з урахуванням характеристик резильєнтності просторових шарів – факторів загроз та потенціалу інноваційного втручання. Для врахування взаємодії багатьох чинників, що формують міську резильєнтність, використано міждисциплінарні підходи і моделі, зокрема метод багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) та модель комплексної оцінки міської резильєнтності DPSIR – "Driving Force-Pressure-State-Impact-Response" (Yan Liang et al., 2024). Приклад аналізу показників просторових характеристик резильєнтності і оцінки базової резильєнтності просторового шару міської системи здійснено на прикладі просторового шару "Озеленення та публічні простори".

Результати

Просторова резильєнтність міського простору – це результат взаємодії багатьох чинників: морфології забудови, функціонального зонування, доступності публічних просторів, системи мобільності, розміщення критичної інфраструктури, рівня озеленення, культурної ідентичності та здатності до кліматичної адаптації. Ці компоненти формуються на перетині різних сфер: містобуду-

вання, архітектури, соціології, урбанекології, транспортного планування та управління. Їхнє цілісне врахування є передумовою створення валідної моделі міської резильєнтності, яка оцінює не лише наявні ресурси, а й реальні функціональні зв'язки у кризових умовах.

Просторовий підхід до аналізу міської резильєнтності є не лише інструментом опису поточного стану урбаністичних систем, а й ключем до моделювання їхньої поведінки у відповідь на різноманітні загрози – від природних катастроф до соціально-економічних криз (Balling et al., 1999). Маркус та Колдінг (Marcus, & Colding, 2014) розробили інтегровану теорію просторової морфології та сталих міських систем, досліджуючи, як фізична організація міського простору – вулиці, блоки, публічні простори – впливає на здатність міст витримувати зовнішні стреси. Автори підкреслюють, що здатність до змін, різноманітність функцій, самоорганізація та навчання є визначальними атрибутами резильєнтності, що тісно пов'язані з просторовим плануванням. У свою чергу, Парізі (Parizi et al., 2022) запропонував структурно-аналітичну модель оцінювання фізичної резильєнтності з використанням ISM-ANP, у якій розглянуто 20 просторових індикаторів, включаючи щільність забудови, ширину вулиць, співвідношення сторін будівель і доступність відкритих просторів. Їхні висновки свідчать, що саме ці характеристики є критичними для ефективного реагування міста на стихійні лиха. Маснаві (Masnavi et al., 2021) у своєму дослідженні виступив з критикою традиційних статичних методів аналізу резильєнтності, запропонувавши адаптивну, трансформаційну модель, яка враховує динаміку просторових змін і взаємодію соціальних, екологічних і фізичних компонентів міського середовища.

Окрему увагу в літературі приділено зв'язку між екологічними мережами та просторовою резильєнтністю. Мертенс (Mertens, 2022) зосередилась на проектуванні зелено-блакитної інфраструктури – парків, зелених коридорів, водойм – як основи для формування стійкого міського простору. Подібну позицію розвивають також Шаріфі та Ямагата (Sharifi, & Yamagata, 2016), які аналізують багатоплановість міської резильєнтності через систему просторових і функціональних взаємозв'язків. Вони пропонують використовувати інструменти просторової симуляції для моделювання сценаріїв ризику та вразливості у різних морфологічних умовах. Дослідження Ван (Wang, 2018) демонструє, як функціональна фрагментація міського простору знижує адаптивний потенціал, зменшуючи ефективність транспортної мережі та обмежуючи доступ до критичної інфраструктури під час криз. Нарешті, Ахерн (Ahern, 2011) наголошує на необхідності інтеграції екологічної резильєнтності в міське планування та проектування, підкреслюючи, що стійкість повинна будуватись не лише навколо функціональних характеристик, але й на основі екосистемних послуг, які безпосередньо формуються у просторі.

Ігнорування просторових параметрів або їх недостатній облік призводить до викривленого розуміння вразливості міських систем і формування неефективних управлінських рішень. Зокрема, це може знижувати ефективність реагування на надзвичайні ситуації, обмежувати доступ до ресурсів і ускладнювати відновлення після криз. Такі характеристики, як щільність і конфігурація забудови, структура транспортної мережі, наявність відкритих просторів і критичної інфраструктури, безпосередньо впливають на здатність міста протистояти стресам

і забезпечувати безперервність основних функцій. Тому включення просторового аналізу в моделі міської резильєнтності слід розглядати не як опцію, а як необхідну основу для комплексного й адаптивного управління міською трансформацією.

Цифрові інструменти у сучасних умовах урбаністичного розвитку стають не лише засобами аналізу величезних масивів просторових даних, а й ключовими механізмами формування просторової резильєнтності міст у цілому (Rahman, & Szabó, 2021; Sicaio et al., 2024) або його окремих систем (Armas et al., 2017; McClymont et al., 2020; Chandra et al., 2021). Висока складність міських систем, багатовимірність ризиків та швидкість змін вимагають застосування технологій, здатних не тільки відображати стан міста, але й моделювати трансформаційні сценарії, адаптувати структуру до загроз та сприяти прийняттю інформованих управлінських рішень.

Цифрові двійники (digital twins), штучний інтелект (AI), аналіз великих даних (Big Data), геоінформаційні системи (GIS) та SAAS-платформи відіграють визначальну роль у просторовому моделюванні, плануванні і трансформації міських територій. Вони дають змогу створювати віртуальні репрезентації міста, які точно відтворюють його фізичну, інфраструктурну та соціальну структуру, відображаючи не лише поточний стан, але й потенційні вразливості. Цифрові інструменти не просто підтримують аналіз просторової резильєнтності – вони стають інфраструктурним підґрунтям для її формування. Ларссон та Хацігеоргіу (Larsson, & Hatzigeorgiou, 2021) підкреслюють, що цифровізація є ключовим інструментом адаптивної резильєнтності в умовах кліматичних та соціально-економічних змін. Вільягра (Villagra et al., 2016), застосовуючи ГІС-аналіз, виявив просторову залежність адаптивного потенціалу міст від конфігурації відкритих просторів, що підтверджує важливість цифрових геопросторових методів для структурного планування. Завдяки аналітичним SAAS-платформам, що об'єднують багатокритеріальні індикатори, стає можливою інтеграція різних рівнів даних – від мікрорівня району до макростратегій національного масштабу.

Зважаючи на поточні виклики і можливості інноваційних цифрових інструментів як методологічної основи динамічної моделі міської резильєнтності, пропонується концепція симуляційно-аналітичної системи для оцінки просторової резильєнтності – від базового рівня до перспективного, з урахуванням характеристик резильєнтності просторових шарів – факторів загроз та потенціалу інноваційного втручання (рис. 1). В основі запропонованої моделі лежить багатокритеріальна оптимізація (МОО), яка дає змогу моделювати та прогнозувати стійкість міських територій до зовнішніх і внутрішніх змін, враховуючи складні взаємозв'язки між різними факторами. Пропонований інструмент – це принципово відкрита симуляційно-аналітична система, побудована на базі супутникових даних, штучного інтелекту та адаптивної логіки обчислень. У ній можливе постійне доповнення наборів характеристик просторової резильєнтності, специфікацій загроз та характеристик загальної міської резильєнтності. Всі ці елементи можуть автоматично оновлюватися та перераховуватись при надходженні нових даних, що забезпечує високу точність і релевантність результатів.

Методологія побудови такої системи базується на ключових теоретичних положеннях і показниках.



Рис. 1. Модель симуляційно-аналітичної системи для оцінки просторової резильєнтності

1. Базова резильєнтність. Враховує наявні просторові характеристики резильєнтності міських систем і може бути узагальнено оцінена через Індекс резильєнтності. Приймається, що індекс резильєнтності обмежується значеннями від 0 до 100, де 0 – відсутність резильєнтності міської системи, 100 – стала система, яка відповідає ідеальним просторовим характеристикам резильєнтності міських систем.

Задано такі рамки значень індексу: дуже високий рівень – 81–100;

високий рівень – 61–80;

середній рівень – 41–60;

низький рівень – 21–40;

дуже низький рівень – 0–21.

Пропонується, що ідеальні просторові характеристики резильєнтності – вираховані та описані значення, при яких система зберігає достатній ступінь резильєнтності. Характеристика є відносною, прийняті показники не є сталими константами, а призначаються відповідно від географічного положення регіону, залежать від природних, соціальних, економічних і політичних умов і корелюються згідно з базовими уявленнями про справедливе, здорове та демократичне суспільство (морально-етичний еталон).

Відповідно приймається, що базова резильєнтність також обмежується значеннями від 0 до 100, де 0 – відсутність міської системи, 100 – стала міська система, яка відповідає ідеальним просторовим характеристикам резильєнтності міських систем. Вона складається з груп характеристик, які мають вплив на резильєнтність того чи іншого просторового шару. Кожній групі призначаються свої рамки значень. В рамках цих значень кожній характеристиці залежно від ступеня впливовості цієї характеристики на резильєнтність просторового шару призначаються свої рамки значень. Водночас сума просторових характеристик дорівнює максимально можливому значенню групи просторових характеристик. Наприклад, просторовий шар "Озеленення та публічні простори" має три групи просторових характеристик: характеристики екологічної та кліматичної стійкості (призначено діапазон від 0 до 40), характеристики соціально-економічного впливу (призначено діапазон від 0 до 20), характеристики інфраструктурної включеності (призначено діапазон від 0 до 40).

Визначення значення кожної характеристики окремо передбачає можливість використання механізмів автоматичного збору даних. Числове значення характеристики просторової резильєнтності дорівнює сумі якісних

значень показників, які мають безпосередній вплив на просторову характеристику. Наприклад, характеристиці Climate Adaptability of Green Spaces в рамках групи "Характеристики екологічної та кліматичної стійкості" призначено діапазон від 0 до 6, де значення 6 може бути присуджене у разі відповідності ідеальним параметрам: "Адаптованими вважаються ті зелені простори, в яких наявні більше 10 видів на 1 га, температура поверхонь не піднімається вище 32 градусів, зволоженість ґрунту не менша за 30 %, індекс вегетації становить > -0,6). Розрахунок цієї характеристики потребує набору показників, які задано так само у вигляді числових діапазонів (в даному випадку поділ рівний):

- індекс вегетації (NDVI, EVI) – діапазон можливих значень від 0 до 1,5;

- температура поверхні – діапазон можливих значень від 0 до 1,5;

- волога ґрунту – діапазон можливих значень від 0 до 1,5;

- біорізноманіття – діапазон можливих значень від 0 до 1,5.

Збір даних у рамках цієї моделі відбувається автоматично, за допомогою супутникових знімків та IoT-даних, що можуть бути отримані за запитом або протягом певного проміжку часу. Джерела цих даних включають реальні та динамічні показники, такі як супутникові знімки, інформація з IoT-систем, геопросторові дані (GIS), дані про мобільність населення та аналітика соціальних мереж. Ці дані доповнюються методами штучного інтелекту та великих даних для прогнозування можливих змін та адаптації міської системи до нових умов.

Пропонована модель інтегрує дані в реальному часі, що дає змогу оперативно коригувати стратегії та адаптуватися до змін у середовищі. Зокрема, для моніторингу змін у ландшафті та інфраструктурі використовуються супутникові знімки, а геопросторові дані дозволяють оцінювати мобільність населення та зміни у використанні територій. Показники мобільності служать для прогнозування соціальних змін та міграцій. Наприклад, у випадку розрахунку характеристики Climate Adaptability of Green Spaces ключові джерела даних включають такі елементи:

- індекс вегетації (NDVI, EVI), що визначається за допомогою супутникових знімків, таких як ті, що отримуються через Copernicus Open Access Hub (П2), Google Earth Engine (П3), та SentinelSat (П4) для автоматизації завантаження даних;

- температура поверхні (LST), яка отримується через супутникові дані таких систем, як MODIS (NASA) (П5), ERA5 (ECMWF) (П6), PyMODIS (П7) або SentinelSat (П4)

для автоматизації процесу завантаження даних. Ці дані доступні також через Copernicus Open Access Hub (П2) та Google Earth Engine (П3);

- волога ґрунту, що визначається за допомогою даних з ERA5 (ECMWF via Copernicus), доступних через cdsapi, Copernicus Climate Data Store, а також через Copernicus Global Land. Дані автоматично обробляються за допомогою таких інструментів, як open-data-cube або Google Earth Engine (GEE). Крім того, використовуються API для запитів до погодних серверів, наприклад OpenWeather API, для отримання погодних даних та історичних даних;

- біорізноманіття, яке оцінюється за допомогою iNaturalist API. У разі потреби додатково можна встановити камери та аудіосенсиори для збору даних, однак це потребуватиме додаткових витрат.

Кожному показнику залежно від отриманих даних присвоюється одна з оцінок: "дуже добре", "добре", "середнє", "низьке", "дуже низьке" – в конкретному числовому значенні. Наприклад, для показника "Біорізноманіття" задані такі рамки (загальний діапазон значень: від 0 до 1,5): "дуже добре": >10 видів на 1 га; регулярне розпізнавання – присвоєно значення 1,5:

"добре": 7–10 видів на 1 га; є динаміка до збільшення – присвоєно значення 1,125;

"середнє": 4–6 видів на 1 га – присвоєно значення 0,75;

"низьке": <3 види на 1 га – присвоєно значення 0,375;

"дуже низьке": 0 видів – присвоєно значення 0.

Таким чином, сума всіх значень показників просторових характеристик резильєнтності дають змогу отримати оцінку базової просторової резильєнтності просторового шару (в даному випадку "Озеленення та публічні простори").

2. Актуальна резильєнтність. Враховує наявні просторові характеристики резильєнтності міських систем, характеристики резильєнтності та ступінь впливовості актуальних та потенційних зовнішніх загроз (вразливість). Методика розрахунку актуального індексу резильєнтності базується на зменшенні вимірності та виборі ознак через використання матриць впливів і кореляцій для аналізу взаємодії між показниками. Вона інтегрує різноманітні дані для створення комплексного індексу, що оцінює стійкість міської системи, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти, і оцінює здатність міських систем адаптуватися до змін і протидіяти загрозам, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти. Її структура базується на гнучкій формулі (див. рис. 1): актуальна резильєнтність = базова резильєнтність +/- характеристики резильєнтності – вразливість.

Під характеристиками резильєнтності розуміємо здатність систем до збереження первісного стану, адаптації та трансформації, вразливість – комплекс актуальних та перспективних загроз, які мають потенційний вплив на життєстійкість міських систем (від'ємне значення = 0). Вони дають змогу оцінити стан резильєнтності кожної з характеристик просторових шарів.

Характеристики резильєнтності пропонується оцінювати через такі здатності адаптуватися, диверсифікувати ресурси і технології, зберігати стійкість та функціонувати:

- Efficiency – здатність ефективно використовувати доступні ресурси;

- Diversity – доступність ресурсів з різними властивостями та характеристиками;

- Redundancy – наявність надлишкових ресурсів;

- Robustness – здатність зберігати свої характеристики під впливом загроз;

- Safety – здатність забезпечувати безпечні умови в умовах загроз;

- Adaptability – здатність адаптуватися та трансформуватися для підвищення стійкості;

- Flexibility – здатність швидко адаптуватися до загроз;

- Inclusivity – здатність захищати найвразливіші верстви населення;

- Innovation – використання інноваційних підходів;

- Integrity – наявність зовнішнього ресурсу, здатного компенсувати дефіцит внутрішніх;

- Decentralization – здатність зберігати стійкість та функціонувати, навіть якщо система втратить центральні вузли чи ресурси.

Характеристики резильєнтності формують уточнювальні коефіцієнти, сума яких являє собою діапазони значень: від $-1/2$ середнього значення просторової характеристики до $+1/2$ середнього значення просторової характеристики. Тобто, якщо просторові характеристики Climate Adaptability of Green Spaces в рамках групи "Характеристики екологічної та кліматичної стійкості" призначено діапазон від 0 до 6, то сума уточнювальних коефіцієнтів – характеристик резильєнтності буде в діапазоні від $-1,5$ до $1,5$. Оцінка характеристик резильєнтності є важливою складовою загального розрахунку, оскільки вони дають змогу скоригувати похибки, отримані при прийнятті рішень щодо визначення конкретних значень ідеальних просторових характеристик резильєнтності.

Характеристики резильєнтності розраховуються також у діапазоні п'яти оцінок: "дуже добре", "добре", "середнє", "низьке", "дуже низьке" і є відповідями на пряме/прямі питання, які пов'язують характеристику просторової резильєнтності з характеристикою здатностей адаптуватися, диверсифікувати ресурси і технології, зберігати стійкість та функціонувати (або навпаки, її вразливість). Наприклад, Climate Adaptability of Green Spaces /характеристика здатності Integrity: "Чи наявні на дотичних ділянках ресурси (види, утримання вологі ґрунтом), які можуть сприяти поліпшенню кліматичної адаптивності?":

"дуже добре": так, наявні (+1,5)

"добре": є ознаки наявності (+0,75)

"середнє": ні, ознак наявності немає (0)

"низьке": є ознаки погіршення ситуації (–0,75)

"дуже низьке": ситуація на дотичних ділянках погіршилась (–1,5).

Розрахунок вразливості передбачає, що це комплекс актуальних і перспективних загроз, які впливають на резильєнтність із різною силою дії. Тому загальний діапазон впливу приймається від 0 до 100, де 0 – впливу немає, 100 – повна руйнація міської системи (від'ємне значення = 0).

Загрози, передбачені в розрахунку, включають в себе загрози навколишнього середовища (екологічні, кліматичні, стихійні лиха), соціальні, геополітичні, економічні та технологічні. Кожна загроза має свої діапазони впливу, які розраховуються з погляду впливовості не на конкретну характеристику просторової резильєнтності, а на просторовий шар загалом. Так, загроза "Використання ядерної зброї" навіть у мінімальному обсязі впливає на екосистеми міст, тому оцінка такої загрози буде:

дуже низька – 0;

низька – (–40);

середня – (–60);

висока – (–80);

дуже висока – (–100).

А така загроза, як "Соціальна поляризація", погіршує ситуацію з погляду догляду, спільної координації при інших катастрофах, але сама по собі не призводить до руйнацій:

- дуже низька – 0;
- низька – (-1,25);
- середня – (-2,5);
- висока – (-3,25);
- дуже висока – (-5).

Кожна загроза оцінюється завдяки отриманню даних наборів показників, які свідчать про ступінь загрози. Передбачається, що збір цих даних відбувається так саме автоматично, за допомогою супутникових та IoT-даних за запитом, або протягом певного проміжку часу. Наприклад, загроза "Повені" потребує отримання значень таких показників:

- рівень води в річках, озерах та водосховищах;
- прогнозування інтенсивності дощів та злив;
- температурні зміни в зонах потенційних повеней;
- швидкість течії води;
- вологість ґрунту в районах, що піддаються затопленню;
- моделювання повеней (аналіз ризику затоплення);
- аналіз стану водовідведення та інфраструктури;
- визначення обсягу затоплених територій;
- Реальні дані про повені (постраждалі райони, затоплені площі);
- оцінка зміни кліматичних умов, що впливають на повені.

3. Перспективна резильєнтність. Її можна бути завдяки низці інноваційних технологій в обмежених проміжках часу та за умови обмежених ресурсів. Під технологіями розуміється широкий набір інженерно-технологічних заходів, які можуть посилити той чи інший просторовий шар загалом або якусь із характеристик, і які можуть бути задіяні в конкретних економічно-політичних умовах в обмежених проміжках часу:

Перспективна резильєнтність = Актуальна резильєнтність + Вплив технологій.

Під впливом технологій розуміється комплекс інженерно-технологічних заходів, які здатні посилити просторові характеристики резильєнтності (як складову базової резильєнтності) та/або характеристики резильєнтності (як складову актуальної резильєнтності). Оцінка впливу технологій залежить від ступеня максимально можливої здатності тієї чи іншої технології змінити показники просторових характеристик резильєнтності.

Наприклад, один із параметрів характеристики Climate Adaptability of Green Spaces – "Біорізноманіття" – оцінений як "низьке": <3 види на 1 га – з присвоєнням значення 0,375. Припустимо, що очікується максимально можливе поліпшення завдяки технології: за 10 років кількість видів може збільшитись до 15. Оскільки значення >10 видів на 1 га показника "Біорізноманіття" є найвищою оцінкою – "дуже добре", це означає, що максимальне числове значення технології, яке може бути присвоєне, дорівнюватиме "максимальному значенню діапазону показника "Біорізноманіття". При цьому, якщо при розрахунку значення виходить за означений діапазон, значення показника приймається ="максимальне значення діапазону показника". "Вплив технологій" оцінюється з урахуванням доступу до фінансових ресурсів та обмеженості в часі. Якщо обмеженість ресурсу та часу для реалізації технології в повному обсязі неможлива – результат зменшується відповідно до ступеня обмеженості на 100 %, 80 %, 60 %, 40 % та 20 %.

Дискусія і висновки

Ґрунтуючись на аналізі праць (Marcus, & Colding, 2014; Masnavi et al., 2021; Zhang et al., 2024), це дослідження узагальнює розуміння просторового виміру як ключового чинника формування міської резильєнтності. Просторові характеристики міста – його морфологія, конфігурація відкритих просторів, структура забудови та розташування критичної інфраструктури – визначають здатність міського організму реагувати на кризові події, адаптуватися та відновлюватися, водночас недостатня увага до просторових аспектів у дослідженнях та плануванні резильєнтності обмежує розуміння реальних вразливостей і потенціалу міських систем, знижуючи ефективність управлінських рішень у сфері безпеки, адаптації та відновлення. Позитивні приклади існуючих цифрових метрик міської резильєнтності (Liu et al., 2022; 2023) характеризуються комплексністю та міждисциплінарністю, але в процесі дослідження було визначено напрям, що потребує подальшої методологічної розробки: пошук шляхів узгодження стратегій підвищення резильєнтності на рівні міської політики та їхньої реалізацією у конкретних просторових рішеннях. Просторові особливості визначають такі критичні аспекти, як доступність інфраструктури, ефективність евакуаційних маршрутів, швидкість мобілізації служб реагування та здатність окремих районів функціонувати автономно. Динамічне просторове моделювання дає змогу точно ідентифікувати зони ризику, адаптувати сценарії реагування до локального контексту та забезпечити цілісну оцінку міської стійкості як динамічного, багатовимірного процесу.

На відміну від традиційних інструментів моніторингу, цифрові моделі забезпечують прогнозування наслідків рішень, інтерактивне тестування сценаріїв та виявлення критичних точок у системі. У такій системі користувач стає активним учасником управління: він має змогу змінювати параметри, запускати альтернативні моделі розвитку та впливати на формування просторової політики. Запропонована динамічна модель міської резильєнтності з можливістю комплексного аналізу поточного стану міської системи і модифікації складових відповідно до змін зовнішнього середовища базується на концептах базової, актуальної та перспективної резильєнтності і математичному моделюванні різноманітних даних для створення комплексного індексу, що оцінює стійкість міської системи, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти, і оцінює здатність міських систем адаптуватися до змін і протидіяти загрозам, враховуючи економічні, соціальні, управлінські та екологічні аспекти. На сьогодні критичним викликом запровадження запропонованої системи є стан поширення в містах інноваційних технологій збору даних, наприклад через технології IoT. Перспективою подальшого дослідження буде інтеграція запропонованої динамічної моделі міської резильєнтності до регіональних і локальних геоінформаційних систем на основі порталних технологій з можливістю в режимі реального часу надавати актуальну інформацію для своєчасного реагування всіх зацікавлених осіб.

Внесок авторів: Надія Антоненко – концептуалізація, методологія, аналіз джерел, підготування огляду літератури та теоретичних засад дослідження, написання (оригінальна чернетка); Дар'я Мальчикова – концептуалізація, методологія, формальний аналіз, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>

- Amirzadeh, M., Sobhaninia, S., & Sharifi, A. (2022). Urban resilience: A vague or an evolutionary concept? *Sustainable Cities and Society*, 81, 103853. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103853>
- Armas, R., Aguirre, H., & Tanaka, K. (2017). Multi-objective optimization of level of service in urban transportation. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '17)*. (pp. 1057–1064). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3071178.3071262>
- Arup. (2015). *City Resilience Index*. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/city-resilience-index>
- Balling, R. J., Taber, J. T., Brown, M. R., & Day, K. (1999). Multiobjective Urban Planning Using Genetic Algorithm. *Journal of Urban Planning and Development*, 125(2), 86–99. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(1999\)125:2\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(1999)125:2(86))
- Chandra, A., Sharath, M. N., Pani, A., & Sahu, P. K. (2021). A multi-objective genetic algorithm approach to design optimal zoning systems for freight transportation planning. *Journal of Transport Geography*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103037>
- Chang, S. (2010). Urban disaster recovery: a measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters*, 34(2), 303–27. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01130.x>
- Connolly, J. (2018). From Systems Thinking to Systemic Action: Social Vulnerability and the Institutional Challenge of Urban Resilience. *City & Community*, 17, 8–11. <https://doi.org/10.1111/cico.12282>
- Fathom. (n.d.). Fathom: Flood hazard data and analytics. <https://www.fathom.global/>
- FM Global. (2022). Global Resilience Index. <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/global-resilience-index>
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 37123:2019 – Sustainable cities and communities – Indicators for resilient cities. <https://www.iso.org/standard/70428.html>
- Larsson, A., & Hatzigeorgiou, A. (2021). Urban resilience and digitalization: A multi-level analysis of climate adaptation in cities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 38, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.12.002>
- Li, P., Xu, T., Wei, S., & Wang, Z.-H. (2022). Multi-objective optimization of urban environmental system design using machine learning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101796>
- Liu, K., Xu, X., Huang, W., Zhang, R., Kong, L., & Wang, X. (2023). A multi-objective optimization framework for designing urban block forms considering daylight, energy consumption, and photovoltaic energy potential. *Building and Environment*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110585>
- Marcus, L., & Colding, J. (2014). Toward an integrated theory of spatial morphology and resilient urban systems. *Ecology and Society*, 19(4), Article 55. <https://doi.org/10.5751/ES-06939-190455>
- Martin, R., & Sunley, P. (2015). On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation. *Journal of Economic Geography*, 15, 1–42. <https://doi.org/10.1093/JEG/LBU015>
- Masnavi, M.-R., Gharai, F., & Hajibandeh, M. (2021). Developing a conceptual framework for urban resilience enhancement: An adaptive and transformative approach. *Cities*, 115, 103201. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103201>
- McClymont, K., Fernandes Cunha, D. G., Maidment, C., Ashagre, B., Vasconcelos, A. F., Batalini de Macedo, M., Nóbrega dos Santos, M. F., Gomes Júnior, M. N., Mendiondo, E. M., Barbassa, A. P., Rajendran, L., & Imani, M. (2020). Towards urban resilience through Sustainable Drainage Systems: A multi-objective optimisation problem. *Journal of Environmental Management*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111173>
- Meerow, S., Pajouhesh, P., & Miller, T. (2019). Social equity in urban resilience planning. *Local Environment*, 24, 793–808. <https://doi.org/10.1080/13549839.2019.1645103>
- Mertens, E. (2022). Resilient City: Landscape Architecture for Climate Change. *Birkhäuser*. <https://doi.org/10.1515/9783035622652>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). Resilient Cities. <https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/resilient-cities.htm>
- Parizi, R. M., Amini, M., Nooraei, S., & Karimi, M. (2022). Developing a hybrid ISM-ANP model for assessing physical urban resilience: A spatial indicators-based approach. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103576>
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2014). Global flood risk with IMAGE scenarios. <https://www.pbl.nl/en/publications/global-flood-risk-with-image-scenarios>
- Rahman, M. M., & Szabó, G. (2021). Multi-objective urban land use optimization using spatial data: A systematic review. *Sustainable Cities and Society*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103214>
- Rockefeller Foundation. (n.d.). The Rockefeller Foundation. <https://www.rockefellerfoundation.org/>
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1654–1677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028>
- Sicuaio, T., Zhao, P., Pilesjo, P., Shindyapin, A., & Mansourian, A. (2024). Sustainable and Resilient Land Use Planning: A Multi-Objective Optimization Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(3), 99. <https://doi.org/10.3390/ijgi13030099>
- UN. (2015). Sustainable Development Goal 11: Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017). Disaster Resilience Scorecard for Cities. <https://www.undrr.org/publication/disaster-resilience-scorecard-cities>
- Villagra, P., Rojas, C., Ohno, R., Xue, M., & Gómez, K. (2016). A GIS-based exploration of the relationships between open space systems and urban resilience. *Habitat International*, 56, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.04.003>
- Wang, Z., Wang, H., Zhang, Y., & Lu, C. (2018). Fragmentation of urban land use and its impact on urban resilience: Evidence from China. *Sustainability*, 10(12), 4750. <https://doi.org/10.3390/su10124750>
- Wicki, S., Schwaab, J., Perhac, J., & Grêt-Regamey, A. (2021). Participatory multi-objective optimization for planning dense and green cities. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64(14), 2532–2551. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1875999>
- Yale Center for Environmental Law & Policy. (2022). Environmental Performance Index. <https://epi.yale.edu/>
- Yan Liang, Yingsong Cheng, Fu Ren, & Qingyun Du. (2024). Urban resilience assessment framework and spatiotemporal dynamics in Hubei, China. *Scientific Reports*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82895-6>
- Zhang, S., Lei, J., Zhang, X., Tong, Y., Lu, D., Fan, L., & Duan, Z. (2024). Assessment and optimization of urban spatial resilience from the perspective of life circle: A case study of Urumqi, NW China. *Sustainable Cities and Society*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105527>

Отримано редакцією журналу / Received: 16.05.25
Прорецензовано / Revised: 21.05.25
Схвалено до друку / Accepted: 26.05.25

Nadiia ANTONENKO, PhD (Architecture)
ORCID ID: 0000-0001-9047-3669
e-mail: antonenko.nv@knuba.edu.ua
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

Daria MALCHYKOVA, DSc (Geogr.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7197-8722
e-mail: darina1378@gmail.com
Kherson State University, Kherson, Ukraine

DYNAMIC MODEL OF URBAN RESILIENCE FOR SPATIAL POLICY DEVELOPMENT

Introduction. This article explores the concept of urban resilience as a key instrument of adaptive governance in the context of multidimensional threats and growing uncertainty. Emphasis is placed on the need to integrate the spatial dimension into resilience research, which remains insufficiently addressed in academic discourse. The aim of the study is to develop a methodological framework for a dynamic model of urban resilience that enables comprehensive analysis of the current state of the urban system and allows for the modification of its components in response to changes in the external environment.

Methods. The research employs analytical methods, scenario modeling, and interdisciplinary approaches and models, including the multi-criteria analysis method and the DPSIR (Drivers–Pressures–State–Impact–Response) framework for comprehensive assessment of urban resilience.

Results. *The proposed dynamic model of urban resilience facilitates comprehensive analysis of the current state of the urban system and adaptation of its components to changes in the external environment. The model is based on the concepts of baseline, current, and prospective resilience, and utilizes mathematical modeling of diverse data to construct a composite index assessing urban system resilience. This index accounts for economic, social, governance, and environmental dimensions, and evaluates the capacity of urban systems to adapt to changes and respond to threats. An applied example is provided through the analysis of spatial indicators of resilience and the evaluation of baseline spatial resilience within the urban system's "Greening and Public Spaces" spatial layer.*

Conclusions. *The study reveals that the spatial characteristics of a city, in the context of building resilience, determine critical aspects such as infrastructure accessibility, efficiency of evacuation routes, responsiveness of emergency services, and the capacity of individual districts to function autonomously. Dynamic spatial modeling enables precise identification of risk zones, contextual adaptation of response scenarios, and comprehensive assessment of urban resilience as a dynamic and multidimensional process.*

Keywords: *urban resilience, spatial layer, residential district, sustainable urban development, dynamic model.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.