

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ СОЦІОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

Кудінов І. О.,

*кандидат філософських наук, доцент,
доцент кафедри соціології
Запорізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-7785-1637
ikudinov@cisr.org.ua*

Синенко А. Ю.,

*аспірант кафедри соціології
Запорізького національного університету
ORCID ID: 0009-0005-0163-0383
anthony.synenko@gmail.com,*

Дроздов К. П.,

*магістрант кафедри економіки та фінансів
факультету менеджменту
Університету імені Коменського в Братиславі (Словаччина)
ORCID ID: 0009-0000-0422-5512
kirilkadrozdov@gmail.com,*

Стаття присвячена дослідженню імітаційного моделювання як інструменту соціологічного аналізу на прикладі вивчення впливу міських зон з обмеженням руху транспорту на поведінку водіїв та рівень забруднення повітря. У роботі розглянуто основні підходи до соціального моделювання, включаючи агент-орієнтоване моделювання, системну динаміку, мережеве моделювання та мультиагентні системи. Особлива увага приділяється агент-орієнтованому моделюванню як найбільш придатному методу для аналізу поведінки водіїв в умовах впровадження зон обмеження руху. На основі адаптованої методології проведено імітаційне моделювання впливу трьох розмірів "зелених зон" (15%, 30% і 40% від загальної площі міста) на рівень викидів забруднюючих речовин. Розроблено алгоритм генерації випадкових маршрутів та класифікації поїздок за їх взаємодією із зоною обмежень. Результати моделювання показали, що найбільшої ефективності у зниженні викидів досягає зона розміром 40% від загальної площі міста. При цьому ключову роль відіграють поведінкові реакції водіїв – скасування поїздок або їх відтермінування до періодів з меншими обмеженнями. Представлено рекомендації щодо подальшого вдосконалення моделі, зокрема через розробку більш детальних алгоритмів розрахунку викидів та інтеграцію з картографічними сервісами.

Ключові слова: агент-орієнтоване моделювання, зони низьких викидів, поведінка водіїв, екологічна політика міста, Python.

Постановка проблеми. Соціальні науки завжди прагнули зрозуміти і пояснити складні динамічні процеси, що відбуваються в суспільстві. Однак у світі, де швидкі зміни та непередбачувані обставини стають нормою, традиційні методи збору та аналізу даних іноді не дозволяють належним чином оцінити вплив масштабних подій на суспільство. Саме в таких умовах особливу цінність набуває імітаційне моделювання – інструмент, що дозволяє створювати віртуальні сценарії соціальної взаємодії та прогнозувати можливі наслідки подій у штучно створеному середовищі.

Імітаційне моделювання – це методологічний підхід, що дозволяє досліджувати складні соціальні процеси через створення віртуальних моделей, які відображають реальні соціальні взаємодії. Воно використовує математичні моделі й алгоритми для формування ситуаційних сценаріїв, де

дослідники можуть аналізувати поведінку індивідів і груп у контрольованому середовищі. Це особливо доцільно у випадках, коли реальні експерименти є неможливими чи неетичними, або коли соціальні явища надто складні для аналізу в традиційний спосіб. Як зазначає Володимир Паніотто, «це один із найперспективніших напрямів для застосування в соціології, адже створення імітаційних моделей дає змогу використовувати поняття, близькі до предметної області соціології. У соціології майже немає функціональних закономірностей, вони переважно стохастичні, крім того, соціологи за нинішньої системи освіти мають математичну підготовку, котра істотно слабша, ніж у фізиків або представників природничих наук, тому імітаційне моделювання створює сприятливіші умови для співпраці математиків і соціологів» (Паніотто, 2014). У сучасній ситуації в Україні, де вплив війни на різні аспекти суспільного життя є надзвичайно багатограним і непередбачуваним, імітаційне моделювання стає незамінним інструментом для аналізу соціальних, економічних і психологічних процесів та ситуацій.

Зокрема, сьогодні соціологи можуть використовувати імітаційне моделювання для оцінки впливу війни на міграцію населення, трансформацію соціальних зв'язків та економічних взаємодій. Наприклад, агент-орієнтоване моделювання (agent-based modeling, ABM) дозволяє створити середовище, де агенти (індивіди чи групи) діють за певними правилами, що відображають, скажімо, умови військових конфліктів або евакуації населення. Такий підхід надає змогу аналізувати колективні зміни, що виникають із сукупності індивідуальних рішень, і передбачати наслідки для різних соціальних систем (Axtell, Farmer, 2022).

Для України, яка переживає масштабну міграцію населення як всередині країни, так і за її межі, імітаційне моделювання може допомогти оцінити потенційний вплив цього явища на ринок праці, освіту та систему охорони здоров'я. Окрім того, моделювання може бути корисним для аналізу адаптації як ВПО у приймаючих громадах, так і взагалі українських громадян у приймаючих країнах, соціально-психологічної підтримки вимушених переселенців та планування політики, спрямованої на реінтеграцію в Україні тощо. Імітаційне моделювання дозволяє не лише прогнозувати, а й знаходити ефективні рішення для кризових ситуацій, які виникають через надзвичайні ситуації, в тому числі, збройні конфлікти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними підходами в соціальному моделюванні є агент-орієнтоване моделювання (ABM), системна динаміка, мережеве моделювання та мультиагентні системи. Кожен з цих підходів має свої особливості та застосовується для різних цілей – від аналізу індивідуальної поведінки до моделювання глобальних процесів і змін у суспільстві.

Агент-орієнтоване моделювання (ABM) є одним з найбільш популярних підходів у моделюванні соціальних процесів, особливо для вивчення міжособистісної взаємодії в складних соціальних системах (Axtell, Farmer, 2022). В рамках цього підходу створюються окремі агенти (які можуть відображати індивідів, групи або організації), що діють за заздалегідь визначеними правилами та можуть приймати рішення на основі своїх «переконань» чи доступної інформації. Ці агенти взаємодіють один з одним і з середовищем, що дозволяє аналізувати виникнення нових зразків поведінки та процесів у результаті їхніх взаємодій (Monti et al, 2023; Šešelja, 2023). Агент-орієнтовані моделі особливо корисні для вивчення явищ, де важливу роль відіграють індивідуальні рішення, як-от поширення інформації, колективні дії чи поведінка в умовах ризику, що є надзвичайно актуальним у сучасних кризових умовах (Poledna et al, 2023).

Системна динаміка (system dynamics) – підхід, що спрямований на моделювання соціальних процесів, але з фокусом на макрореспективу. На відміну від ABM, де наголос робиться на індивідуальній поведінці, системна динаміка базується на концепції зворотних зв'язків та взаємозалежностей між змінними (Венгіна, 2011). Цей підхід є потужним інструментом для моделювання економічних і демографічних процесів, таких як зміна чисельності населення, соціальна нерівність, чи, скажімо, вплив політики на економічний розвиток (Cosenz, Noto, 2016). У системній динаміці взаємозв'язки між різними компонентами соціальної системи визначаються математичними рівняннями, що дозволяє моделювати складні соціальні явища на рівні великих груп або цілих суспільств.

Мережеве моделювання застосовується для аналізу соціальних структур та відносин між індивідами або групами. Цей підхід дозволяє візуалізувати і вивчати мережі соціальних зв'язків, таких як комунікація між людьми, економічні взаємодії чи міграційні потоки (Богуславська, 2006). У мережевих моделях велике значення мають такі фактори, як інтенсивність та сила зв'язків між агентами, що дозволяє дослідити, як структура мережі може впливати на поширення інформації, інновацій або навіть захворювань (Rahman et al, 2009). Мережеве моделювання особливо важливе для вивчення динаміки соціальних медіа та формування громадської думки, адже воно дозволяє наочно побачити, як певні інформаційні вузли можуть впливати на велику кількість людей.

Мультиагентні системи (MAS) поєднують різні підходи та дозволяють одночасно моделювати взаємодію між окремими агентами та великими соціальними системами (Будур, Бойко, 2020). На

відміну від АВМ, де зазвичай використовуються індивідуальні агенти, у мультиагентних системах можуть співіснувати різноманітні агенти, що взаємодіють як з іншими агентами, так і з більшими системами (Celaya, Desrochers, 2009). Це дає змогу створювати комплексні моделі, наприклад, де кожен агент у системі представляє окремий регіон або організацію. Мультиагентні системи широко застосовуються в міському плануванні, аналізі екосистем та для моделювання впливу політики на різні групи населення (Chernyshov, 2015).

Кожен з описаних підходів має свої переваги і обмеження, але в сукупності вони надають соціологам багатий інструментарій для розуміння різних аспектів соціальної динаміки. В умовах сучасних викликів ці підходи набувають ще більшої актуальності, оскільки дозволяють соціологам досліджувати як локальні, так і глобальні зміни, прогнозувати можливі наслідки соціальних рішень і сприяти розробці адаптивної та гнучкої соціальної політики.

Для ілюстрації практичного застосування імітаційного моделювання в соціологічних дослідженнях ми розглянемо актуальний кейс, що відображає важливі аспекти сучасного міського планування та соціальних змін. Мова йде про імітаційне моделювання впливу міських зон з обмеженням руху (англійською звучить як Urban Low Emissions Zone (ULEZ), надалі будемо їх називати «зеленими зонами»), на поведінку водіїв і загальну мобільність міських жителів. ULEZ є стратегічною ініціативою, покликаною значно зменшити рівень забруднення в міських зонах, обмежуючи доступ для транспортних засобів, що виробляють велику кількість викидів. Ці зони стали важливими елементами екологічної політики міст і отримали визнання як ефективний спосіб боротьби з транспортним забрудненням і стимулювання сталого розвитку (Low Emission Zones, 2018).

З огляду на стрімке зростання міського населення та посилення екологічних проблем, запровадження «зелених зон» стає однією з ключових відповідей міст на виклики урбанізації. У зв'язку з прогнозом, що до 2050 року дві третини світового населення мешкатимуть у містах (Комнатний, 2021), зростає потреба в рішучих діях для вирішення проблем транспортного затору та забруднення повітря. Імітаційне моделювання, в даному контексті, дозволяє глибше зрозуміти, як соціальні структури та екологічна політика взаємодіють в умовах дії «зелених зон», та передбачити, яким чином поведінка міських жителів може адаптуватися до нових умов мобільності та обмежень.

Особливу увагу привертає концепція управління поведінкою (англійською behavioural operations management (BOM)), що у поєднанні з імітаційним моделюванням забезпечує ширше розуміння не тільки операційних управлінських рішень, але й соціально-поведінкових змін в умовах дії «зелених зон». Стратегії BOM, що враховують культурні й поведінкові особливості міських спільнот, дозволяють розробляти ініціативи, які не лише змінюють умови пересування, а й стимулюють екологічно орієнтовану поведінку через мотиваційні механізми (Lurkin et al, 2021). Таким чином, дослідження впливу «зелених зон» інтегрує соціологічний аналіз з інструментами міського управління, забезпечуючи комплексне розуміння того, як соціальні норми та екологічні пріоритети формують поведінку мешканців.

Методологічною основою нашої роботи стали результати тих досліджень, що були зосереджені на питаннях впровадження зон з обмеженням руху транспорту та їхнього впливу на міське середовище. Автори цих робіт проаналізували політичні, соціальні та культурні аспекти запровадження «зелених зон» з метою вдосконалення якості повітря у містах. Оскільки подібні зони спрямовані на зменшення забруднення повітря та поліпшення якості життя, вони стають важливими інструментами екологічної політики муніципалітетів більшості країн світу.

Так, дослідження Бігазі і Руле акцентує на важливості врахування поведінкових змін водіїв у відповідь на появу зон обмеження руху транспорту, таких як скорочення кількості поїздок або вибір транспортних засобів з меншими викидами. Дослідження показує, що ефективність зон з обмеженням руху транспорту значною мірою залежить від контексту міського середовища, включно з демографічними та культурними факторами (Bigazzi, Rouleau, 2017). Подібний підхід використовує і Морал-Карседо, який аналізує результати запровадження «зелених зон» в Мадриді, де спостерігалося скорочення дорожнього руху в межах міста, але водночас збільшення навантаження на навколишні райони, що вказує на потенційні побічні ефекти (Moral-Carcedo, 2024).

Дослідження Чекато та ін. акцентує на необхідності комплексного підходу до реалізації «зелених зон», зокрема врахування ймовірних відхилень водіїв від стандартних маршрутів та переходу на екологічні види транспорту. Автори доводять, що такі зони можуть сприяти оновленню транспортного парку та зміні транспортних звичок, але водночас підкреслює потребу у врахуванні додаткових екологічних впливів, які можуть виникати поза межами зон обмеження (Seccato et al, 2024).

Особливе місце серед досліджень займає робота Луркіна та ін., в якій використано метод імітаційного моделювання для оцінки ефективності зон з обмеженням викидів, де автори запропонували концептуальну структуру, що аналізує такі характеристики «зелених зон», як охоплення території, тривалість дії обмежень та адаптивність поведінки водіїв. Запропонована модель не лише оцінює

рівень забруднення повітря всередині зони, а й розглядає потенційні екологічні наслідки для навколишніх районів. Як показали результати роботи, використання сценаріїв поведінки, таких як уникнення зон обмеження або використання транспортних засобів із нульовими викидами, дозволяє краще зрозуміти адаптацію водіїв до змін і можливий вплив таких «зелених зон» на якість повітря (Lurkin et al, 2021).

Одним із обмежень, з якими ми стикнулися під час вибору основи для подальшого аналізу, то це неможливість відтворення результатів дослідження в українських умовах. По-перше, деякі дослідження потребують значних фінансових ресурсів, а точніше технічних передумова – починаючи від доступу до значної кількості транспортних засобів і закінчуючи засобами фіксації GPS-координат. По-друге, наявні дослідження, де безпосередньо застосовуються методи імітаційного моделювання виявились непридатними для аналізу у зв'язку із неможливістю отримати дані розрахунків авторів (електронні адреси, що було вказано у публікації не дійсні) для їх відтворення у наших умовах. Саме тому всі представлені далі результати є результатом наших власних експериментів, хоча теоретично засновані на моделі Луркіна та ін.

Виклад основного матеріалу. Зміст нашого імітаційного моделювання розгортається навколо адаптації підходу, запропонованого Луркіним та ін., для вивчення впливу зон з обмеженням викидів на поведінку водіїв і забруднення повітря в міських умовах. Підхід можна віднести до агент-орієнтованого моделювання (ABM), оскільки їх дослідження включало створення сценаріїв, де окремі «агенти» – водії з різними характеристиками транспортних засобів та поведінковими реакціями – взаємодіють з середовищем. У цій моделі враховуються різні поведінкові сценарії для водіїв, такі як уникнення зони, відміна поїздки (або заміна транспортних засобів на електромобілі) або коригування часу поїздки (Lurkin et al, 2021).

Імітаційне моделювання має допомогти відповісти на два питання: 1) на скільки впливає розмір «зеленої зони» на рівень зниження забруднення повітря; 2) як зміна поведінки водіїв впливає на зниження викидів.

У межах дослідження «зелених зон» ми дотримуємося трьох основних аспектів, важливих для їхнього впровадження (Lurkin et al, 2021): характеристик транспортних засобів, визначення зони та часових рамок обмежень, які разом складають так звані VAT-параметри. Наша робота базується на загальній логіці, викладеній в оригінальному джерелі, але ми здійснили власну реалізацію, зокрема коригування формул розрахунків.

Особливу увагу ми приділили відтворюваності й прозорості дослідження: увесь код і дані доступні у відкритому репозиторії, що дозволяє іншим дослідникам перевіряти результати та розвивати дослідження (<https://github.com/iitiro/ulez>). Такий підхід до відкритої науки контрастує з відсутністю доступних додаткових матеріалів і неможливістю верифікації розрахунків в оригінальній статті.

Ми визначаємо три розміри «зелених зон» у відсотках від загальної площі та позначаємо їх різними кольорами: розміри становлять 15%, 30% і 40% від загальної площі. Для точного відображення розмірів зон у просторі 100x100 одиниць, відсоткові значення конвертуються у фактичні розміри. Результати, представлені на рис. 1, ілюструють три «зелені зони»: Зона 1–15%, Зона 2–30% і Зона 3–40%.

Модель працює за умови надання (наявності) даних, що відображають характеристики транспортного потоку, категорії транспортних засобів та стандарти викидів транспортних засобів. Зазвичай дані мають відношення до відповідного населеного пункту і можуть бути отримані на офіційних порталах муніципалітетів, тематичних веб-ресурсах або за офіційним запитом до профільних органів влади.

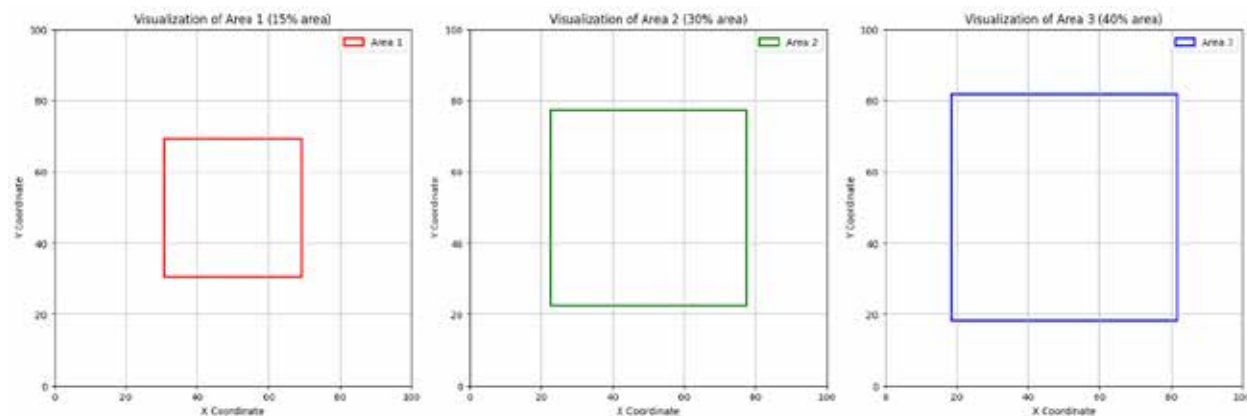


Рис. 1. Три типи «зелених зон»

Перший набір даних відображає розподіл трафіку (кількості транспортних засобів) протягом доби. Ми визначаємо часові інтервали від півночі до півночі наступного дня, поділені на годинні сегменти. Для кожної години ми призначаємо значення ймовірності, яке відображає щільність трафіку в цей період. Враховуючи максимальну та мінімальну швидкості у місті (50 км/год та 10 км/год відповідно), ми обчислюємо середню швидкість для кожної години на основі ймовірності трафіку. Також враховується швидкість наступної години для побудови комплексного профілю швидкості протягом дня. Цей набір даних зберігається як 'traffic_distribution.csv' для подальшого аналізу.

Другий набір даних відображає початкові відсоткові частки різних категорій транспортних засобів. Сюди входять легкові автомобілі з бензиновими двигунами, дизельні легкові автомобілі, комерційні транспортні засоби (дизельні) та мотоцикли (бензинові), причому для кожної категорії призначається ймовірність на основі їхньої поширеності. Ці ймовірності нормалізуються, щоб їхня сума дорівнювала одиниці, що забезпечує узгоджений розподіл. Цей набір даних зберігається як 'vehicle_categories.csv' для використання у моделюванні.

Третій набір даних відображає розподіл за віковими категоріями транспортних засобів у країні відповідно до екологічних стандартів. У ньому представлені легкові автомобілі, комерційні транспортні засоби та мотоцикли, з даними про рік виробництва. Для кожного типу транспорту ми обчислюємо загальну кількість транспортних засобів і визначаємо ймовірнісний розподіл для кожного стандарту, враховуючи частку транспортних засобів, що відповідають стандартам від Euro 6 до Euro 1. Цей набір даних зберігається як 'euro_classes.csv' і надає детальний розподіл транспортних засобів за стандартами викидів для нашого аналізу.

Для забезпечення керованості аналізу та моделювання ми зосереджуємося на одному дні, припускаючи, що протягом цього часу відбувається певна кількість індивідуальних поїздок. Для генерації випадкових поїздок використовується розроблений нами алгоритм (<https://github.com/iitiro/ulez>). Алгоритм починається з визначення функції для генерування випадкових координат у просторі 20x20, що представляє міське середовище (центр міста) з максимальною відстанню в діаметрі 20 км. Кожна пара координат позначає початкову та кінцеву точки поїздки. Обчислюється евклідову відстань між цими точками з округленням до трьох знаків після коми.

Для класифікації кожної поїздки на основі її взаємодії із «зеленою зоною» функція обчислює відповідний випадок для кожної поїздки. Початкова та кінцева точки маршруту перевіряються на перебування всередині чи поза зоною обмежень. В результаті кожна поїздка (маршрут) відноситься до однієї з п'яти категорій: обидві точки всередині зони, виїзд із зони, в'їзд у зону, перетин зони або обидві точки початку і закінчення маршруту знаходяться поза зоною.

У візуалізаціях використовуються кольори для диференціації п'яти випадків, і накладається прозорий зелений квадрат, що представляє «зелену зону». Кожна поїздка представлена у вигляді вектору (стрілка вказує на напрям руху).

Перші чотири категорії маршрутів – це ті, які перетинають «зелену зону», повністю (як у категорії 1) або частково (як у категоріях 2, 3 і 4). У той час як категорія 5 – це маршрути, які повністю уникають зони обмежень.

Згідно Луркіну та ін., ефективність «зелених зон» у досягненні цілей зі зниження викидів значною мірою залежить від поведінки «постраждалих» водіїв (маршрутів, що підпали під обмеження). Зокрема, у разі постійного функціонування «зеленої зони» (наприклад, сценарії RR1, RR2 і RR3) водії, які підпадають під обмеження, мають два основні варіанти дій (Lurkin et al, 2021):

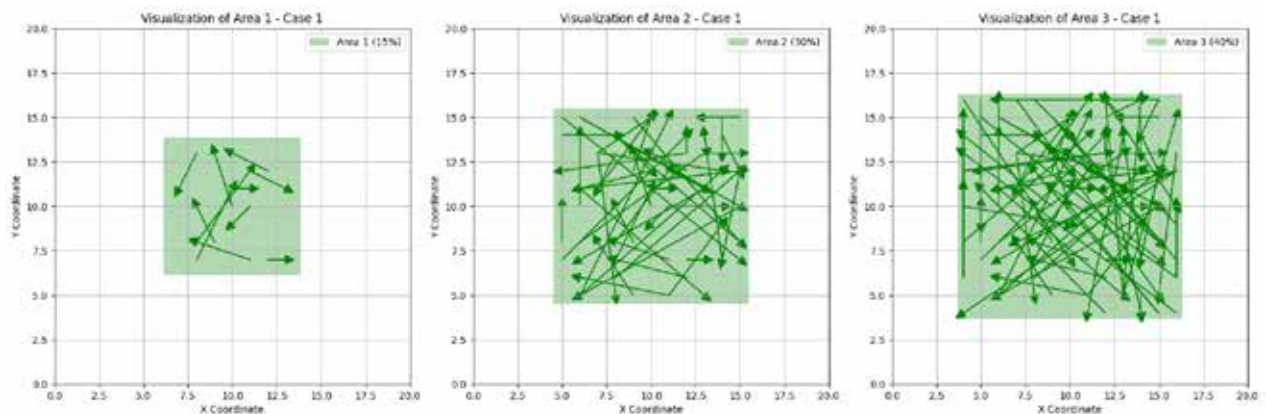


Рис. 2. Візуалізація першої категорії маршрутів

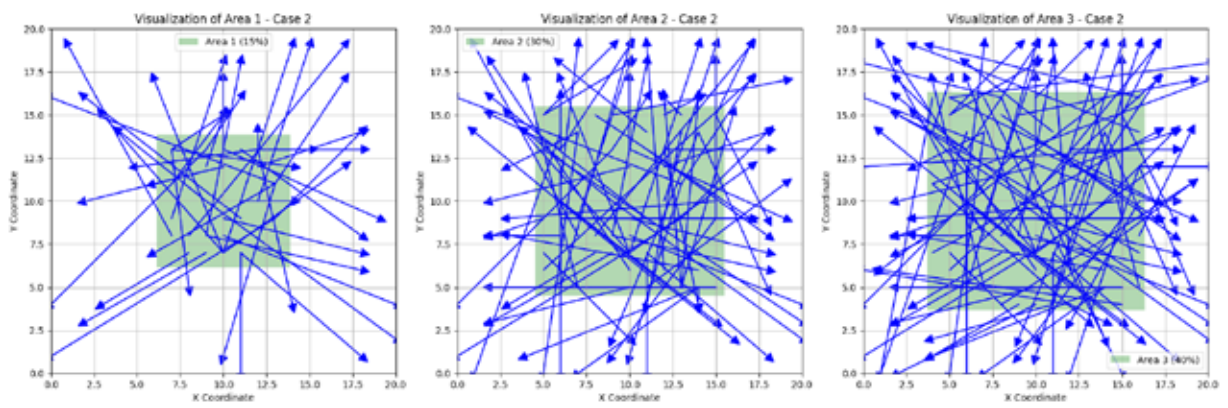


Рис. 3. Візуалізація другої категорії маршрутів

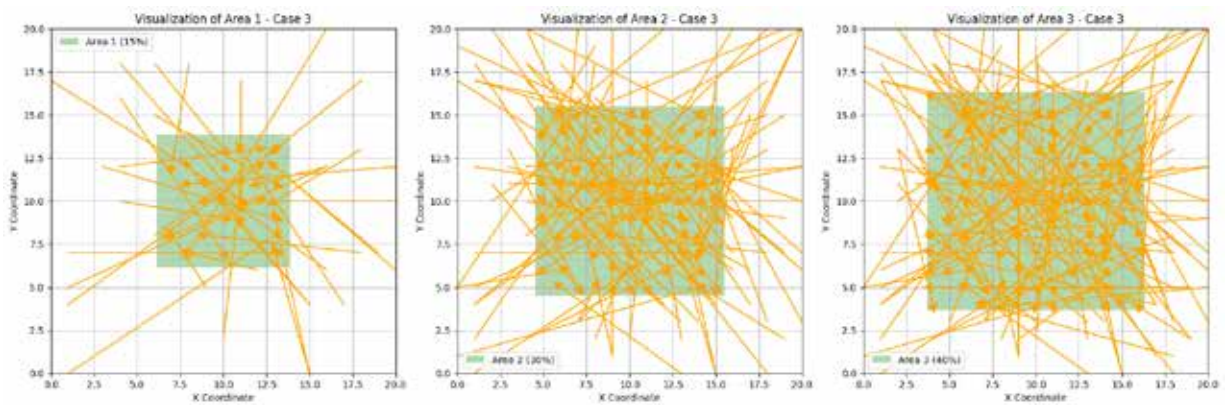


Рис. 4. Візуалізація третьої категорії маршрутів

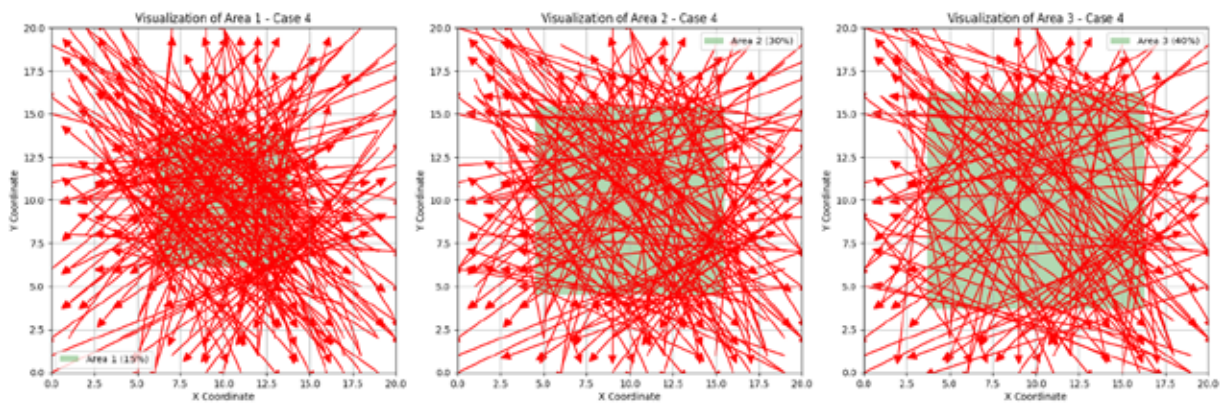


Рис. 5. Візуалізація четвертої категорії маршрутів

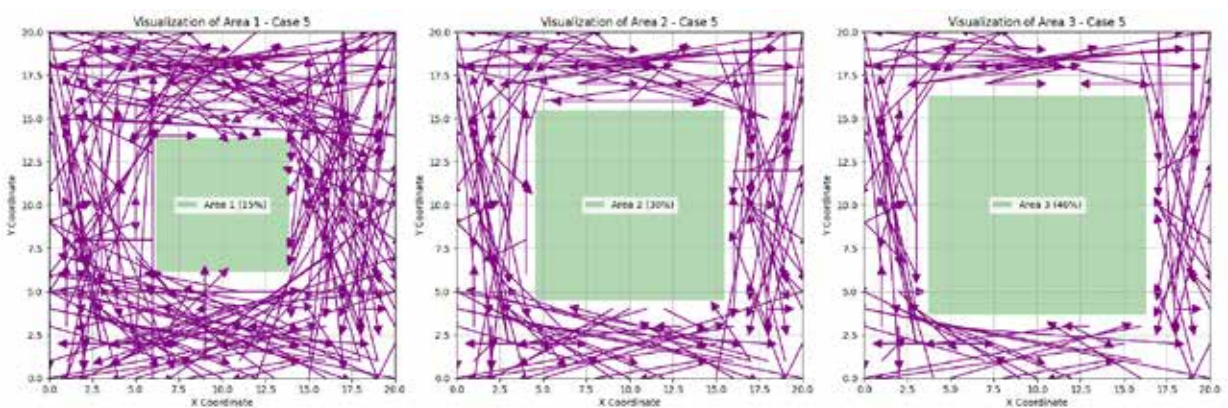


Рис. 6. Візуалізація п'ятої категорії маршрутів

1. Замінити транспортний засіб – коли заборона поширюється на всі транспортні засоби з високими викидами, водії можуть обрати заміну на транспортні засоби з нульовими викидами. Така заміна може бути двох видів:

а) повна заміна для всієї поїздки – водії використовують транспортний засіб з нульовими викидами для всієї подорожі від початкової до кінцевої точки, що позначено як Поведінковий сценарій 1 (BS1).

б) часткова заміна – водії залишають свої транспортні засоби з високими викидами на спеціальних стоянках і використовують транспортні засоби з нульовими викидами для частини поїздки в межах «зеленої зони», що позначено як Поведінковий сценарій 2 (BS2).

2. Об'їхати «зелену зону» за рахунок вибору більш довшого маршруту, що позначається як Поведінковий сценарій 3 (BS3).

3. Скоригувати час відправлення – у випадках, коли «зелена зона» не працює цілодобово (тобто обмеження є непостійними), водії «заборонених» транспортних засобів можуть коригувати час відправлення, щоб уникнути обмежень під час їх деактивації. Припускається, що водії можуть змінити час відправлення максимум на одну годину. Поведінкові сценарії BS4 і BS5 включають коригування часу відправлення.

У наших розрахунках ми представили три сценарії для опису поведінки водіїв у разі наявності обмежень. Перший сценарій охоплює ситуації, де обмеження не впливають на маршрут, і водії можуть продовжити свою поїздку без змін початкових планів. Другий сценарій враховує ситуації, де обмеження значно впливають на маршрут, змушуючи водіїв повністю відмовитися від поїздки або перейти на інший вид транспорту. Третій сценарій стосується водіїв, які можуть відтермінувати поїзду на 1-2 години до скасування обмежень, що дозволяє їм виконати маршрут.

Для подальшої роботи коду ми об'єднали алгоритм генерації випадкових маршрутів із даними ймовірностей про час початку руху, тип, категорію транспортного засобу тощо). Після чого було застосовано правила обмежень для кожного випадку у масиві. Для кожної зони ми визначили дев'ять правил обмежень («1_RR1» до «1_RR9» для зони 1, 2 та 3).

Наступним етапом є розрахунок викидів. Для розрахунку рівня викидів для кожного транспортного засобу спочатку потрібно було визначити середню швидкість руху залежно від часу доби. Це було важливо, оскільки умови руху, а отже, й швидкості транспортних засобів, значно варіюються протягом дня. Для досягнення цього ми використали дані розподілу трафіку, які містять ймовірність заторів у різні години. Ми розрахували швидкість, з якою кожен транспортний засіб буде рухатися під час подорожі, враховуючи час її початку, що дозволило визначити тривалість кожної поїздки, а також обсяги викидів.

В результаті всі маршрути було поділено на три окремі категорії. Перша категорія включає транспортні засоби, які, завдяки своїм специфічним характеристикам (часу подорожі або особливостям маршруту) не підпадали під жодні обмеження. Ці транспортні засоби завершували свої поїздки без змін, викидаючи однаковий обсяг забруднюючих речовин – «незмінний» обсяг викидів. Друга категорія складається з транспортних засобів, які через різні причини не могли розпочати або продовжити свою поїздку. Ці транспортні засоби фактично сприяли зниженню загальних викидів. Третя категорія складається з транспортних засобів, які відтермінували рух, і змогли здійснити свою подорож. Ці транспортні засоби, ймовірно, викидали менше забруднюючих речовин, оскільки час їхньої подорожі був пристосований до періоду з меншими обмеженнями.

Щоб підсумувати загальні викиди, програма вираховує суму викидів для всіх категорій у кожній зоні, як у вигляді табличних даних, так і діаграм.

Висновки. Результати імітаційного моделювання ситуації впровадження «зеленої зони» у місті із заданою чисельністю транспортних засобів (наприклад, не менше 5000 одиниць) дозволяють стверджувати, що розмір «зеленої зони» суттєво впливає на рівень викидів. Зона розміром 40% від

Таблиця 1

Правила обмеження руху транспортних засобів відповідно до категорії авто та часу руху

Тривалість обмежень	Рух дозволено лише для транспортних засобів з нульовими викидами	Рух дозволено лише для бензинових транспортних засобів класу Euro 6 та мотоциклів класу Euro 3	Рух дозволено лише для бензинових транспортних засобів
24 години	RR1	RR2	RR3
3 7 до 19 години	RR4	RR5	RR6
3 7 до 10 та з 16 до 19 години	RR7	RR8	RR9

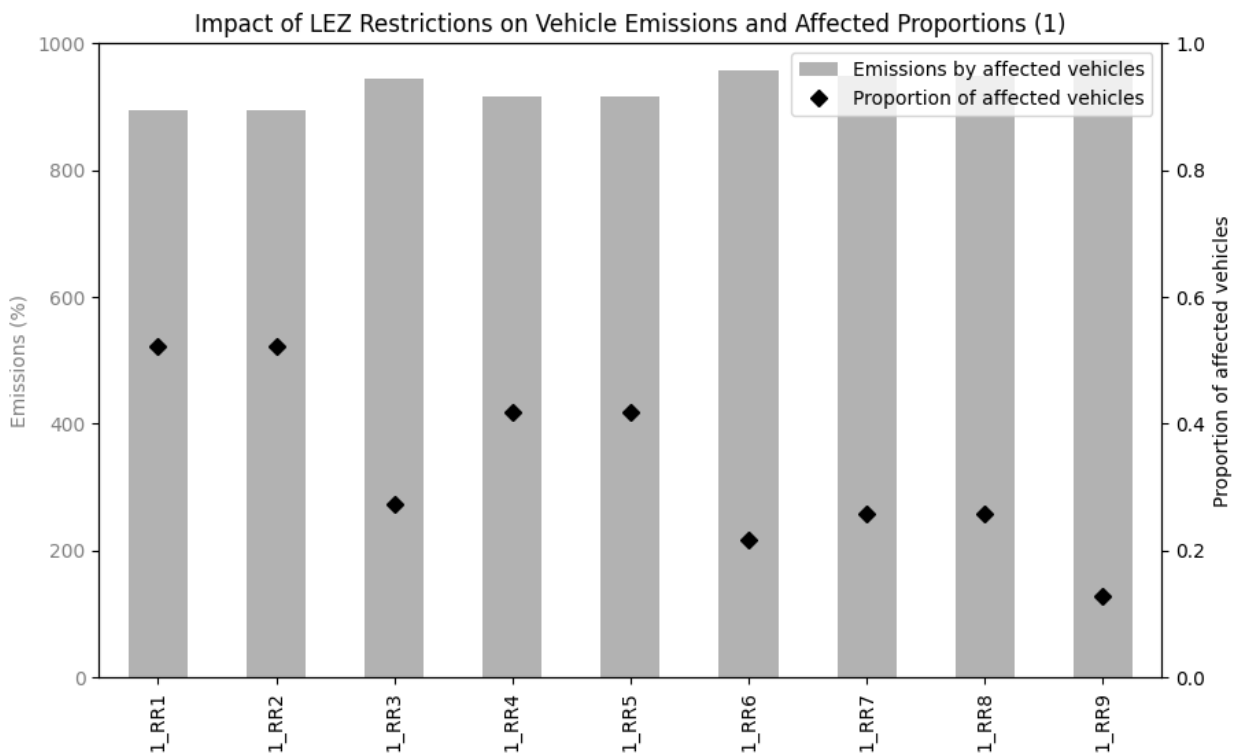


Рис. 7. Вплив обмежень на рівень викидів для «зеленої зони» розміром 15%

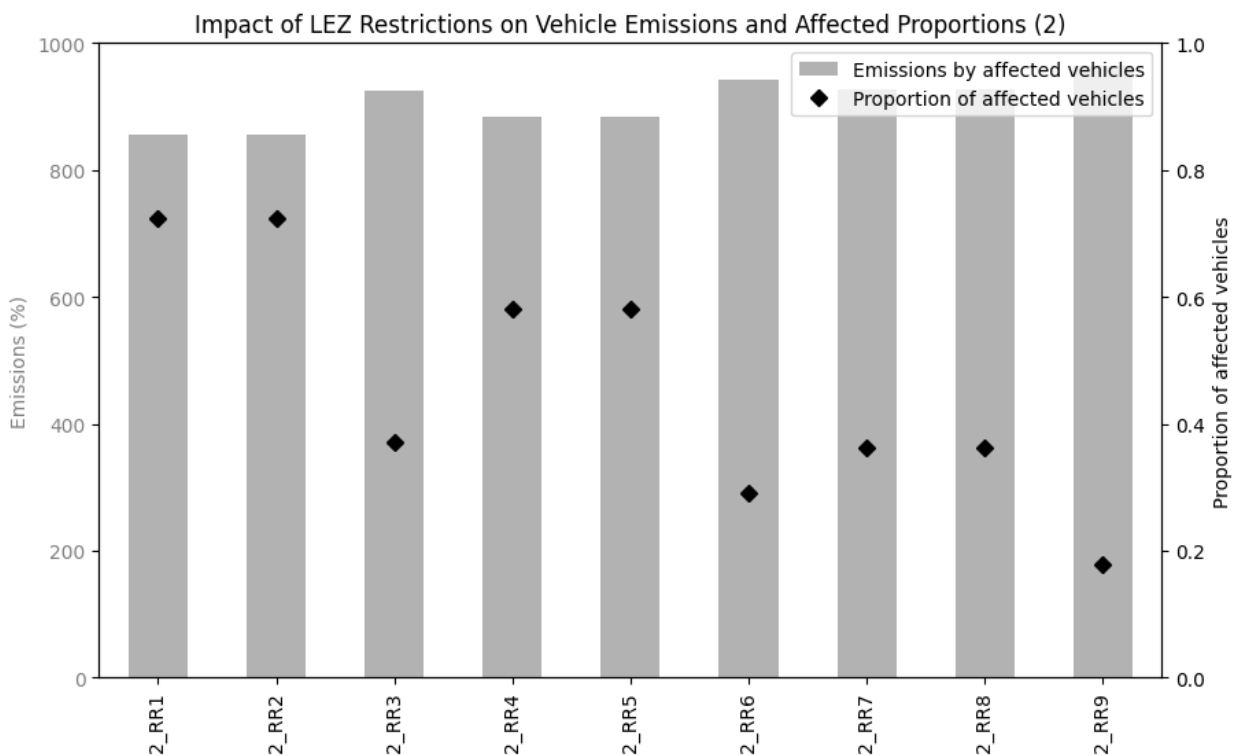


Рис. 8. Вплив обмежень на рівень викидів для «зеленої зони» розміром 30%

загальної площі території міста дає найбільше зниження загальних викидів. Це зумовлено головним чином великою кількістю транспортних засобів, що скасовують свої поїздки, зменшуючи таким чином викиди. Навпаки, менші зони, наприклад, зона розміром у 15%, не спроможна істотно зменшити рівень викидів. Результати також ілюструють те, що поведінкові реакції користувачів доріг, такі як

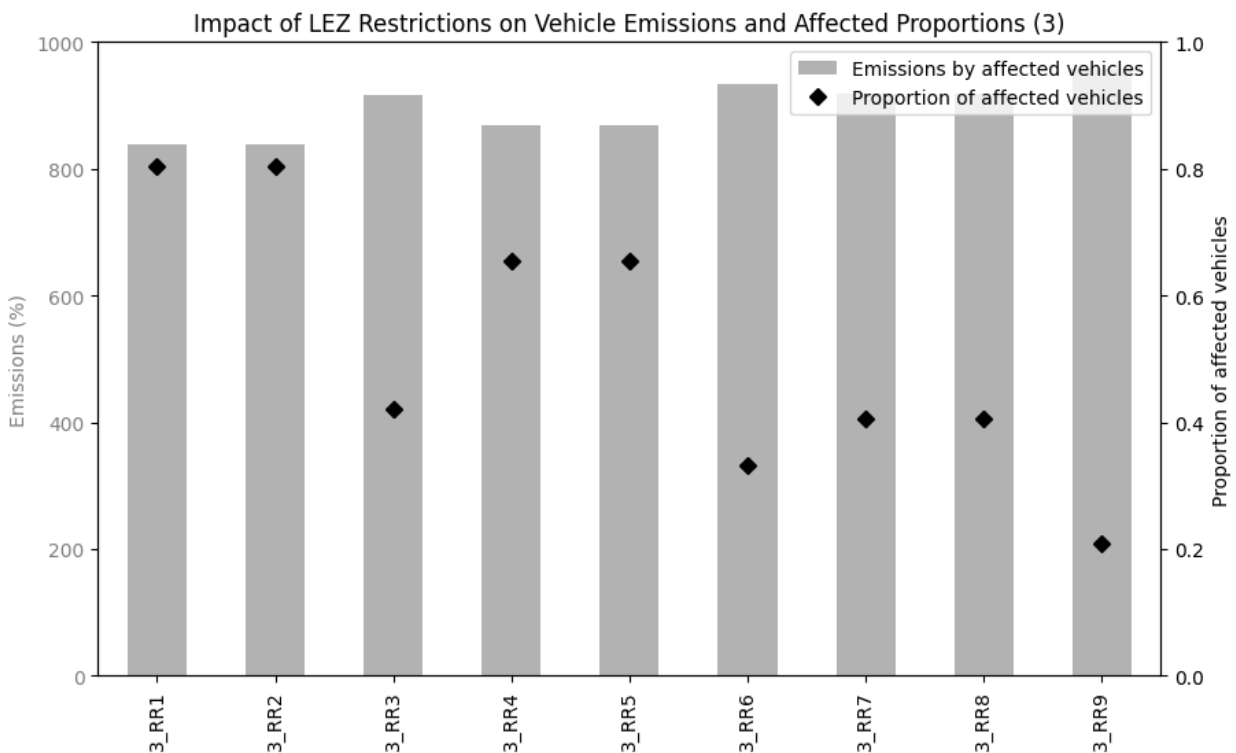


Рис. 9. Вплив обмежень на рівень викидів для «зеленої зони» розміром 40%

скасування поїздок або відтермінування подорожі до закінчення обмежень, відіграють важливу роль у визначенні ефективності «зелених зон». З розширенням зони обмежень більше транспортних засобів змушені скасовувати свої поїздки, або відтермінувати їх до тих часових проміжків, коли рівень забруднення повітря можна знизити до потрібного рівня.

Слід зазначити, що представлений у роботі приклад імітаційного моделювання може отримати подальший розвиток і вдосконалення, особливо за умов колективної роботи над вихідним кодом програми. Подальші напрямки досліджень можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів більш чіткого розрахунку викидів з урахуванням не двох, а більш швидкісних режимів, а також врахування даних про затори. Для роботи подібних алгоритмів можна навіть підключати відповідні сервіси – Google Maps, OpenStreetMap тощо.

Kudinov I., Synenko A., Drozdov K. Simulation modeling as a tool for sociological analysis

The article explores simulation modeling as a tool for sociological analysis, focusing on studying the impact of urban low emission zones (ULEZ) on driver behavior and air pollution levels. The paper examines the main approaches to social modeling, including agent-based modeling, system dynamics, network modeling, and multi-agent systems. Particular attention is paid to agent-based modeling as the most suitable method for analyzing driver behavior in the context of implementing restricted traffic zones. The theoretical framework includes a comprehensive review of existing research on the implementation of low emission zones and their impact on urban environments. The study emphasizes the importance of behavioral operations management concepts in understanding social and behavioral changes in response to traffic restrictions. The methodology is based on an adapted version of previous research, with a focus on transparency and reproducibility. All code and data are made available in an open repository, allowing other researchers to verify and build upon the results. The simulation considers three sizes of ULEZ (15%, 30%, and 40% of the total city area) and their impact on emission levels. A custom algorithm was developed to generate random routes and classify trips based on their interaction with the restriction zone. The study incorporates three key datasets: traffic distribution throughout the day, initial percentage shares of different vehicle categories, and the distribution of vehicles by age categories according to environmental standards. The simulation algorithm classifies routes into five categories based on their interaction with ULEZ. Three behavioral scenarios were analyzed: situations where restrictions do not affect the route, cases where restrictions significantly impact the route leading to trip cancellation or modal shift, and scenarios where

drivers can delay their trip by 1–2 hours until restrictions are lifted. Nine restriction rules were defined for each zone, varying by vehicle type and time of day. The emission calculations took into account average speed variations throughout the day and traffic conditions. The results demonstrate that the size of ULEZ significantly affects emission levels, with the 40% zone achieving the greatest reduction in total emissions. This is primarily due to the large number of vehicles canceling their trips. Behavioral responses of road users, such as trip cancellation or postponement, play a crucial role in determining the effectiveness of ULEZs. As the restriction zone expands, more vehicles are forced to either cancel their trips or delay them until periods when air pollution can be reduced to required levels. The model integrates various factors including traffic patterns, vehicle categories, and emission standards, providing a comprehensive framework for analyzing the impact of low emission zones. The study concludes with recommendations for further model improvement, particularly through the development of more detailed emission calculation algorithms and integration with mapping services. Potential future research directions include incorporating more speed regimes in emission calculations and considering traffic congestion data through integration with services like Google Maps and OpenStreetMap.

Key words: agent-based modeling, low emission zones, driver behavior, urban environmental policy, Python.

Література:

1. Богуславська К. Мережевий підхід: причини виникнення, напрями дослідження мереж та їх типологізація. *Наукові записки Інституту політичних і етнонаціональних досліджень ім І.Ф. Кураса НАН України: Збірник наукових праць*. Київ, 2006. Вип. 32. С. 402–414. URL: https://ipiend.gov.ua/wp-content/uploads/2018/07/bohuslavska_merezhevyi.pdf. Дата доступу: 2024-10-28.
2. Будур І.М., Бойко С.А. Мультиагентна модель системи підтримки прийняття рішення по управлінню розподіленими об'єктами. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. 3(63). С. 54–61. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.08>. Дата доступу: 2024-10-28.
3. Венгріна І.Є. Досвід застосування імітаційного моделювання у дослідженнях соціальних явищ та процесів. *Наукові записки НаУКМА. Соціологічні науки*. 2011. Т. 122. С. 14–18. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/3671>. Дата доступу: 2024-10-28.
4. Комнатний С.О. Філософія сталого розвитку як дороговказ для формування сучасної державної житлової політики. *Філософські та методологічні проблеми права*. 2021. Т. 1. Вип. 21. С. 60–71. URL: <https://doi.org/10.33270/02212101.60>. Дата доступу: 2024-10-28.
5. Паніотто В. Амосов і моделювання соціальних процесів. *Соціологія: теорія, методи, маркетинг*. 2014. Випуск 1. С. 199–205. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmm_2014_1_17. Дата доступу: 2024-10-28.
6. Axtell R.L., Farmer J.D. Agent-Based Modeling in Economics and Finance: Past, Present, and Future. *INET Oxford Working Paper No. 2022-10*. 2022. URL: <https://oms-inet.files.svdcn.com/production/files/JEL-v2.0.pdf>. Accessed: 2024-10-28.
7. Bigazzi A., Rouleau M. Can traffic management strategies improve urban air quality? A review of the evidence. *Journal of Transport & Health*. 2017. Issue 7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.08.001>. Accessed: 2024-10-28.
8. Ceccato R., Rossi R., Gastaldi M. Low emission zone and mobility behavior: Ex-ante evaluation of vehicle pollutant emissions. *Transportation Research. Part A: Policy and Practice*. 2024. Issue 185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104101>. Accessed: 2024-10-28.
9. Celaya J.R., Desrochers A.A. Modeling and Analysis Methods for Multi-Agent Systems. *I-Tech Education and Publishing*. 2009. URL: <https://doi.org/10.5772/6596>. Accessed: 2024-10-28.
10. Cosenz F., Noto G. Applying System Dynamics Modelling to Strategic Management: A Literature Review. *Systems Research and Behavioral Science*. 2016. Volume 33, Issue 6. P. 703–741. URL: <https://doi.org/10.1002/sres.2386>. Accessed: 2024-10-28.
11. Chernyshov K.R. Multi-Agent Systems within Modeling and Identification Problems. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Volume 48, Issue 3. P. 1308–1313. ISSN 2405-8963. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.266>. Accessed: 2024-10-28.
12. Hendijani R. Behavioral Operations Management: A Review of the Field. *Journal of Psychological Research*. 2019. Volume 1, Issue 3. P. 12–30. URL: <https://doi.org/10.30564/jpr.v1i3.736>. Accessed: 2024-10-28.
13. *Low Emission Zones. Urban Access Regulations in Europe*. 2018. URL: <https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main>. Accessed: 2024-10-28.

14. Lurkin V, Hambuckers J., Woensel T. van. Urban Low Emissions Zones: A Behavioral Operations Management Perspective. *Transportation Research Part A*. 2021. Issue 144. P. 222–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.11.015>. Accessed: 2024-10-28.
15. Monti C., Pangallo M., De Francisci Morales G. et al. On Learning Agent-based Models from Data. *Scientific Reports*. 2023. Issue 13. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35536-3>. Accessed: 2024-10-28.
16. Moral-Carcedo J. Dissuasive Effect of Low Emission Zones on Traffic: the Case of Madrid Central. *Transportation*. 2024. Issue 51. P. 25–49. URL: <https://doi.org/10.1007/s11116-022-10318-4>. Accessed: 2024-10-28.
17. Poledna S., Miess M.G., Hommes C., Rabitsch K. Economic forecasting with an agent-based model. *European Economic Review*. 2023. Volume 151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2022.104306>. Accessed: 2024-10-28.
18. Rahman M.A., Pakštās A., Wang F.Z. Network modelling and simulation tools. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2009. Volume 17, Issue 6. P. 1011–1031. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.02.005>. Accessed: 2024-10-28.
19. Šešelja Dunja. Agent-Based Modeling in the Philosophy of Science. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2023. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/agent-modeling-philsience>. Accessed: 2024-10-28.

References:

1. Bohuslavska, K. (2006). Merezhevyi pidkhyd: prychny vynyknennia, napriamy doslidzhennia merezh ta yikh typolohizatsiia [Network Approach: Reasons for Emergence, Directions of Network Research, and Their Typology]. *Naukovi zapysky Instytutu politychnykh i etnonatsionalnykh doslidzhen im. I.F. Kurasa NAN Ukrainy: Zbirnyk naukovykh prats*, Kyiv, 32, 402–414. URL: https://ipiend.gov.ua/wp-content/uploads/2018/07/bohuslavska_merezhevyi.pdf. Accessed: 2024-10-28. [in Ukrainian]
2. Budur, I.M., Boiko, S.A. (2020). Multiagentna model systemy pidtrymky pryiniattia rishennia po upravlinniu rozpodilenyomy ob'ekty [A Multiagent Model of a Decision Support System for Managing Distributed Objects]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 3(63), 54–61. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.08>. Accessed: 2024-10-28. [in Ukrainian]
3. Vengrina, I.Ye. (2011). Dosvid zastosuvannia imitatsiinoho modeliuvannia u doslidzhenniakh sotsialnykh yavlyshch ta protsesiv [Experience in Using Simulation Modeling in the Study of Social Phenomena and Processes]. *Naukovi zapysky NaUKMA. Sotsiologichni nauky*, 122, 14–18. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/3671>. Accessed: 2024-10-28. [in Ukrainian]
4. Komnatnyi, S.O. (2021). Filosofiia staloho rozvytku yak dorohovkaz dlia formuvannia suchasnoi derzhavnoi zhytlovoi polityky [The Philosophy of Sustainable Development as a Guide for Forming Modern State Housing Policy]. *Filosofski ta metodolohichni problemy prava*, 1(21), 60–71. URL: <https://doi.org/10.33270/02212101.60>. Accessed: 2024-10-28. [in Ukrainian]
5. Paniotto, V. (2014). Amosov i modeliuvannia sotsialnykh protsesiv [Amosov and the Modeling of Social Processes]. *Sotsiologiiia: teoriia, metody, marketynh*, 1, 199–205. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmm_2014_1_17. Accessed: 2024-10-28. [in Ukrainian]
6. Axtell, Robert L., Farmer, J. Doynе. (2022) Agent-Based Modeling in Economics and Finance: Past, Present, and Future. *INET Oxford Working Paper No. 2022-10*. URL: <https://oms-inet.files.svdcn.com/production/files/JEL-v2.0.pdf>. Accessed: 2024-10-28.
7. Bigazzi, A., Rouleau, M. (2017) Can traffic management strategies improve urban air quality? A review of the evidence. *Journal of Transport & Health*, 7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.08.001>. Accessed: 2024-10-28.
8. Ceccato, R., Rossi, R., Gastaldi, M. (2024) Low emission zone and mobility behavior: Ex-ante evaluation of vehicle pollutant emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104101>. Accessed: 2024-10-28.
9. Celaya, Jose R., Desrochers, Alan A. (2009) Modeling and Analysis Methods for Multi-Agent Systems. *I-Tech Education and Publishing*. URL: <https://doi.org/10.5772/6596>. Accessed: 2024-10-28.
10. Cosenz, F., Noto, G. (2016) Applying System Dynamics Modelling to Strategic Management: A Literature Review. *Systems Research and Behavioral Science*, 33 (6), 703–741. URL: <https://doi.org/10.1002/sres.2386>. Accessed: 2024-10-28.
11. Chernyshov, K.R. (2015) Multi-Agent Systems within Modeling and Identification Problems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1308–1313. ISSN 2405-8963. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.266>. Accessed: 2024-10-28.
12. Hendijani, R. (2019) Behavioral Operations Management: A Review of the Field. *Journal of Psychological Research*, 1(3), 12–30. <https://doi.org/10.30564/jpr.v1i3.736>. Accessed: 2024-10-28.

13. *Low Emission Zones. Urban Access Regulations in Europe*. (2018) URL: <https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main>. Accessed: 2024-10-28.
14. Lurkin, V., Hambuckers, J., Woensel, T. van. (2021) Urban low emissions zones: A behavioral operations management perspective. *Transportation Research Part A*, 144, 222–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.11.015>. Accessed: 2024-10-28.
15. Monti, C., Pangallo, M., De Francisci Morales, G. et al. (2023) On learning agent-based models from data. *Scientific Reports*. 13, 9268. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35536-3>. Accessed: 2024-10-28.
16. Moral-Carcedo, J. (2024) Dissuasive effect of low emission zones on traffic: the case of Madrid Central. *Transportation*, 51, 25–49. URL: <https://doi.org/10.1007/s11116-022-10318-4>. Accessed: 2024-10-28.
17. Poledna, S., Miess, M.G., Hommes, C., Rabitsch, K. (2023) Economic forecasting with an agent-based model. *European Economic Review*, 151, 104306. ISSN 0014-2921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2022.104306>. Accessed: 2024-10-28.
18. Rahman, M.A., Pakštas A., Wang, F.Z. (2009) Network modelling and simulation tools. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(6), 1011–1031. ISSN 1569-190X. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.02.005>. Accessed: 2024-10-28.
19. Šešelja, Dunja. (2023) Agent-Based Modeling in the Philosophy of Science. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/agent-modeling-philscience>. Accessed: 2024-10-28.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2024

Стаття рекомендована до друку 17.12.2024