

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-09>

УДК 004.94

Газдюк Катерина Петрівна, Phd, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7568-4422>

Срібний Олександр Ігорович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0009-3366-4237>

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

РОЗРОБКА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПОШИРЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Газдюк К. П. Срібний О. І. Розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. У статті представлено підхід до моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань за допомогою багатопараметричної мультиагентної системи, яка враховує як біологічні, так і соціальні фактори. Метою дослідження є створення гнучкої моделі, яка дозволяє аналізувати епідеміологічні процеси в умовах урбанізованого середовища та оцінювати ефективність різних сценаріїв втручання. У межах моделі кожен агент репрезентує індивідуальну одиницю популяції з власними характеристиками, включаючи стан здоров'я, соціальну активність, маршрут пересування та поведінкові особливості. Для опису інфекційного процесу було використано адаптовану SIR-модель, інтегровану у мультиагентну систему, що дозволяє врахувати ймовірнісні переходи між станами вразливості, інфікування та одужання залежно від особливостей взаємодій між агентами. У якості інструментарію реалізації обрано мову Java з використанням платформи MASON, яка дозволяє створювати моделі з високим рівнем деталізації та масштабованості. Для інтерактивної візуалізації було використано JavaFX у поєднанні з бібліотекою GeoFX, що забезпечує відображення просторової структури моделі, станів агентів та поширення інфекції у часі та просторі. Візуалізація є не лише демонстраційним елементом, а й аналітичним інструментом, що дозволяє оцінювати ефективність превентивних заходів у режимі реального часу. Результати симуляцій показали здатність моделі відображати складні патерни поширення інфекцій, у тому числі залежність динаміки від просторового розташування джерела інфекції. Робота демонструє потенціал мультиагентного підходу в поєднанні з геопросторовою візуалізацією як ефективного засобу підтримки рішень у сфері громадського здоров'я.

Ключові слова: багатопараметрична модель, мультиагентне моделювання, інфекційні захворювання, динаміка поширення, стратегії контролю.

Hazdiuk K., Sribnyi S. Development of a multi-parameter multi-agent system for modeling the dynamics of the spread of infectious diseases. This paper presents an approach to modeling the dynamics of infectious disease spread using a multiparametric multi-agent system that integrates both biological and social factors. The main goal of the research is to develop a flexible simulation model that enables the analysis of epidemiological processes in urban environments and the evaluation of various intervention strategies. Each agent in the model represents an individual with personalized characteristics, including health status, daily mobility, social activity, and behavioral patterns. The core infection dynamics are based on an adapted SIR model, integrated into the agent-based framework, allowing probabilistic transitions between susceptible, infected, and recovered states depending on the nature of agent interactions. The implementation was carried out using Java and the MASON simulation platform, which supports high-resolution and scalable agent-based modeling. To enable interactive spatial analysis, the visualization module was developed using JavaFX and the GeoFX library. This combination allows for the dynamic rendering of agent locations, health states, and the spatial-temporal progression of the infection. The visualization not only enhances interpretability but also serves as a real-time analytical tool for assessing the effectiveness of preventive measures and containment policies. Simulation results demonstrate the model's capacity to reflect complex patterns of infection spread, including the impact of initial infection placement and social interaction networks. The developed system shows the practical potential of combining agent-based simulation with geospatial visualization for epidemiological forecasting and decision-making in public health management.

Keywords: multiparametric modeling and multi-agent modeling approaches for understanding infectious disease spread dynamics and designing control strategies.

Постановка наукової проблеми. У світі, де інфекційні захворювання є постійною загрозою здоров'ю людей, розробка ефективних стратегій контролю та прогнозування поширення цих захворювань є критично важливою. Особливо в умовах загострення пандемічних ризиків, вчені та медичні фахівці шукають нові підходи до моделювання динаміки поширення інфекцій.

У цьому контексті розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання стає актуальною. Вона спрямована на врахування різноманітних факторів, які впливають на поширення інфекційних захворювань, таких як соціальні мережі, географічні особливості, ступінь імунізації та інші. Система має на меті надати інструмент для прогнозування та управління епідеміологічною ситуацією, а також для розробки ефективних стратегій контролю за поширенням захворювань. Використання багатопараметричних та мультиагентних підходів дозволяє більш точно відтворити складні взаємодії між різними чинниками, що впливають на поширення інфекцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз існуючих систем моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань виявляє різноманітність підходів та методів, які застосовуються для прогнозування та управління епідемічними процесами.

Моделі SIR є одними з найпоширеніших та класичних підходів до моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. Вони ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, що описують зміни в кількості осіб у трьох основних категоріях: схильних до зараження (Susceptible), інфікованих (Infectious) та одужалих чи імунізованих (Recovered).

Основною ідеєю моделі SIR [1] є те, що особи поступово переходять від категорії схильних до інфікованих після контакту з хворою особою, після чого, під впливом імунної відповіді або лікування, вони можуть одужати і стати імунізованими або вилікованими. Ця модель дозволяє прогнозувати, як швидко може поширюватися захворювання в популяції та які частки популяції будуть інфіковані в певний момент часу. Хоча модель SIR є досить простою, вона може надати важливі відомості про епідемічний процес та допомогти в розробці стратегій контролю за поширенням інфекційних захворювань. Однак важливо враховувати, що ця модель має обмеження, такі як відсутність урахування просторових та індивідуальних варіацій, що можуть бути важливими для деяких захворювань та ситуацій.

Модель GeoCity — це агентно-орієнтована комп'ютерна модель, яка імітує функціонування міста з урахуванням демографічних, соціальних та просторово-часових характеристик його мешканців. В основі моделі лежить репрезентація кожного мешканця як окремого агента з індивідуальними параметрами — віком, станом здоров'я, щоденним розкладом (робота, навчання, відпочинок), місцем проживання та пересуванням містом. GeoCity [2] дозволяє моделювати повсякденну активність населення в межах урбаністичного середовища, враховуючи типову інфраструктуру міста: житлові райони, офіси, навчальні заклади, транспортні маршрути тощо. Завдяки цьому модель забезпечує реалістичне відтворення контактів між агентами — ключового фактора при аналізі поширення інфекційних захворювань.

Модель була спеціально адаптована для вивчення епідеміологічних процесів, зокрема — поширення вірусу SARS-CoV-2. GeoCity дозволяє досліджувати вплив різних сценаріїв поведінки населення, змін у розкладі, рівня імунітету, а також структурних особливостей міського простору на динаміку епідемії. Враховуючи високу деталізацію та гнучкість, модель GeoCity є потужним інструментом для підтримки прийняття рішень у сфері громадського здоров'я та урбаністичного планування під час пандемій.

Geospatial SEIR(D)-модель [3] [4] є багаторівневою геопросторовою епідеміологічною моделлю, заснованою на багатоагентному підході з використанням безперервно-дискретних станів. Модель поєднує класичну SEIR(D)-структуру (Susceptible – Exposed – Infected – Recovered – Deceased) із просторово-часовою динамікою поведінки людей, що дозволяє точно відображати процеси поширення вірусних інфекцій в урбанізованому середовищі. Кожен агент у цій моделі репрезентує індивідуальну одиницю з унікальними характеристиками, включаючи стан здоров'я, повсякденну активність, мобільність і географічну прив'язку. Модель враховує складну взаємодію між поведінковими факторами (такими як щоденні маршрути, розклад активностей) і епідеміологічними параметрами (включаючи ймовірність зараження, імунітет, тривалість інфекційних фаз). Завдяки використанню геоданих, забезпечується просторово точне відображення процесів взаємодії між агентами в межах заданого середовища, що дозволяє досліджувати вплив як індивідуальних, так і колективних стратегій на динаміку інфекції.

Розроблені алгоритми дають змогу оцінювати чисельні показники в межах моделювання: кількість осіб у різних епідеміологічних станах, зміни у просторі та часі, темпи поширення та вплив превентивних заходів. У межах проведених симуляцій модель продемонструвала здатність відображати складні нелінійні залежності між соціальною поведінкою, просторовим переміщенням агентів та динамікою захворюваності. Окремо було проаналізовано ефективність різних сценаріїв стримування, серед яких зміни у поведінці, запровадження обмежень на переміщення, а також впровадження масових профілактичних заходів. Результати показали, що поєднання поведінкових інтервенцій і стратегій управління ризиками може істотно змінити як характер поширення інфекції, так і її тривалість. Запропонована модель слугує універсальним інструментом для кількісного аналізу ефективності заходів у контексті епідеміологічного моделювання, а також для розробки оптимальних стратегій реагування у сфері громадського здоров'я.

Мультиагентні системи в останні роки отримали значний інтерес у сфері моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. Це стало можливим завдяки їхній здатності

моделювати складні соціальні та взаємодіючі системи, такі як популяції людей, з урахуванням індивідуальних властивостей та поведінки кожного агента. У мультиагентних системах [5] [6] кожен індивідуальний агент може мати власні характеристики, такі як ступінь вразливості до зараження, інфекційний статус та стратегії поведінки. Це дозволяє краще відтворювати складні взаємодії між особами та їхній вплив на динаміку поширення захворювань.

Однією з переваг використання мультиагентних систем є їхня здатність моделювати різноманітні сценарії та стратегії контролю за поширенням захворювань. Наприклад, вони можуть допомогти в оцінці ефективності різних методів соціального дистанціювання, вакцинації та ізоляції, а також визначенні найефективніших шляхів боротьби з епідеміями та пандеміями. Застосування мультиагентних [7] [8] систем в моделюванні динаміки поширення інфекційних захворювань відкриває нові можливості для дослідження та прогнозування епідеміологічних ситуацій, що може призвести до покращення стратегій контролю та запобігання захворюванням.

Методи машинного навчання, зокрема нейронні мережі та класифікація, стали важливим інструментом для аналізу та прогнозування динаміки епідемій. Вони відкривають можливості для розвитку нових підходів у галузі епідеміології та пандеміології, дозволяючи ефективно аналізувати великі обсяги даних та виявляти складні закономірності в поширенні захворювань.

Нейронні мережі можуть бути навчені на основі історичних даних про епідеміологічні випадки, щоб передбачити майбутні тенденції поширення захворювань. Вони можуть враховувати різноманітні фактори, такі як густота населення, рівень вакцинації, мобільність населення та інші, що допомагає у точному прогнозуванні епідеміологічних ситуацій. Класифікаційні моделі [9] [10] також можуть бути корисні для ідентифікації ризикових груп населення, аналізу ефективності заходів контролю за епідемією та визначення оптимальних стратегій запобігання зараженню. Вони допомагають враховувати різні сценарії та прогнозувати можливі наслідки введення різних заходів управління епідемічною ситуацією.

Застосування методів машинного навчання у галузі епідеміології відкриває широкі перспективи для розвитку інноваційних підходів до контролю та запобігання поширенню захворювань. Вони допомагають швидше виявляти важливі тренди та реагувати на них, що може значно покращити ефективність стратегій боротьби з епідеміями та пандеміями.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у розвитку класичних епідеміологічних моделей, таких як SIR та SEIR, їхня здатність точно відтворювати реальні епідемічні процеси залишається обмеженою. Ці моделі не враховують просторову неоднорідність, індивідуальні особливості поведінки населення, взаємодію між окремими соціальними групами, а також динамічні зміни умов зовнішнього середовища. Також обмеженою є здатність класичних моделей до адаптації в реальному часі на основі нових даних, що особливо актуально в умовах стрімкого поширення інфекцій, таких як COVID-19.

Існуючі мультиагентні системи та геопросторові моделі частково усувають ці недоліки, проте часто залишаються надмірно складними для практичного використання або не включають елементи навчання з підкріпленням для автоматичного налаштування поведінкових стратегій. Недостатньо також досліджено поєднання мультиагентного моделювання з інструментами машинного навчання для формування ефективних, адаптивних стратегій управління епідеміями. У цьому контексті актуальним стає завдання створення гнучкої багатопараметричної мультиагентної моделі, здатної відображати динаміку захворювання з високим рівнем деталізації та пристосованості до реальних умов.

Загальною метою дослідження є розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання поширення інфекційних захворювань, яка здатна враховувати широкий спектр факторів, що впливають на епідемічну динаміку. Система покликана поєднати можливості класичних епідеміологічних моделей (таких як SIR/SEIR) із гнучкістю агентно-орієнтованого підходу, що дозволяє моделювати індивідуальні особливості поведінки, соціальні взаємодії, мобільність, просторову неоднорідність та рівень імунізації населення. Використання багатьох параметрів дозволяє детальніше відобразити складні процеси взаємодії в межах популяції та їхній вплив на темпи поширення інфекції. Такий підхід спрямований на створення інструменту, який забезпечує більш реалістичне та точне прогнозування розвитку епідемій. А також створення функціональної моделі, здатної підтримувати ухвалення рішень у сфері громадського здоров'я за рахунок моделювання різних сценаріїв стримування захворювання, таких як соціальне

дистанціювання, вакцинація, локдауни та інші профілактичні заходи. У рамках розробленої системи передбачається також застосування методів машинного навчання для покращення адаптивності та точності прогнозування. В результаті реалізована система може бути ефективним інструментом як для дослідницьких завдань, так і для практичного використання органами управління у кризових ситуаціях.

Виклад основного матеріалу. Для ефективної реалізації мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань необхідно обґрунтовано підійти до вибору відповідних технологій та методів. Обрані інструменти мають забезпечувати гнучкість, масштабованість, інтеграцію з методами машинного навчання та підтримку візуалізації результатів моделювання. У цьому розділі розглянуто критерії вибору технологій, обґрунтовано використання певних програмних засобів, середовищ розробки та методологій, а також описано їхню доцільність у контексті поставлених завдань дослідження.

Таблиця 1 надає огляд трьох основних засобів для розробки багатопараметричної мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань разом із їх перевагами та недоліками. Вибір конкретного інструменту буде залежати від потреб дослідження, експертизи команди розробників та наявних ресурсів.

Таблиця 1. Огляд основних засобів розробки

Варіант	Опис	Переваги	Недоліки
Java з використанням бібліотек, таких як Deeplearning4j або Weka	Java — мова програмування, що має широке застосування в розробці програмного забезпечення. Deeplearning4j і Weka — це бібліотеки машинного навчання та імітаційних моделей для Java.	Можливість використання Java для розробки великих та масштабованих систем. Широкий вибір бібліотек для машинного навчання та імітаційних моделей.	Java може бути менш зручною у використанні для деяких дослідників порівняно з Python. Обмежена кількість спеціалізованих бібліотек порівняно з Python.
NetLogo	NetLogo — спеціалізована платформа для моделювання агентів, яка має графічний інтерфейс та простий мову програмування. Вона призначена для створення складних мультиагентних систем.	Простий у використанні та має графічний інтерфейс. Оптимізований для моделювання агентів та інтерактивної візуалізації.	Обмежений у функціональності порівняно з загальністю мов програмування.
MATLAB	MATLAB — інтерактивна середовище для чисельних розрахунків, яка має вбудовані функції для розв'язування диференціальних рівнянь та моделювання агентів.	Вбудована підтримка чисельних методів та статистичних аналізів. Простий синтаксис та багато готових функцій.	Комерційна ліцензія може бути дорогою для деяких дослідників. Менша спільнота користувачів порівняно з вільно розповсюджуваними мовами програмування.

Визначення вимог і архітектурне проектування. На етапі визначення вимог та архітектурного проектування формуються ключові параметри мультиагентної системи та її

структурна організація. Насамперед, окреслюються характеристики агентів індивідуалізованих одиниць моделювання, які можуть бути наділені такими властивостями, як вік, стать, імунологічний статус, тип соціальної активності, а також епідеміологічний стан (сприйнятливий, інфікований, одужалий, померлий).

Особливу увагу приділено моделюванню міжагентної взаємодії, яка реалізується залежно від типології контактів (сімейні, професійні, випадкові) та характеристик середовища. Використання графових структур забезпечує відтворення складної мережі соціальних зв'язків між агентами. Параметризація процесів передачі захворювання включає визначення інкубаційного періоду, рівня контагіозності, тривалості хвороби та ймовірності розвитку ускладнень. Важливо, щоб модель залишалась гнучкою та адаптивною для імітації різноманітних сценаріїв.

Архітектурна структура системи складається з низки функціональних модулів, зокрема: модуля генерації агентів, модуля міжагентної взаємодії, модуля передачі інфекції, модуля реалізації інтервенцій (вакцинація, карантинні заходи), а також модуля візуалізації даних та збору статистичних показників. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну, масштабовану модель, придатну як для наукових досліджень, так і для прийняття рішень у сфері епідеміологічного прогнозування та управління ризиками.

Для розробки було обрано бібліотеку MASON, яка реалізована на мові програмування Java. MASON є потужною платформою для моделювання складних мультиагентних систем, що дає змогу створювати моделі з високим рівнем деталізації агентів і їх взаємодії. Бібліотека підтримує як дискретно-часові, так і безперервні моделі, що дозволяє враховувати складні динамічні процеси, такі як поширення інфекцій чи соціальна взаємодія. Однією з основних переваг MASON є її гнучкість і можливість інтеграції з іншими інструментами Java, що забезпечує ефективну обробку даних і використання бібліотек для машинного навчання. Вбудовані компоненти для візуалізації дозволяють створювати графічні інтерфейси для відображення результатів моделювання, що особливо корисно при аналізі результатів великих симуляцій.

MASON також має активну спільноту користувачів, що сприяє постійному розвитку та вдосконаленню бібліотеки. Її відкритий вихідний код і можливість налаштування під конкретні задачі роблять її підходящою для моделювання складних процесів, таких як поширення інфекційних захворювань, адаптивні політики втручання або соціальні динаміки.

Реалізація моделі агентів передбачає створення окремих агентів, кожен з яких представляє індивідуального члена популяції з різними характеристиками, такими як вік, стать, стан здоров'я та інші біологічні чи соціальні фактори. Агенти мають свою поведінку та здійснюють взаємодії з іншими агентами в рамках моделювання поширення інфекційних захворювань. Ці взаємодії можуть включати передачу інфекції, яка залежить від численних факторів: ймовірності зараження, типу контакту (наприклад, безпосередній контакт чи через середовище), тривалості та інтенсивності взаємодій, а також від соціальних і поведінкових аспектів, таких як дотримання карантинних заходів чи носіння масок.

Моделювання агентів включає програмування механізмів, які дозволяють агентам приймати рішення на основі поточного стану їхніх параметрів (наприклад, стан здоров'я) і взаємодії з іншими агентами. Такі взаємодії можуть призводити до зміни стану агента, наприклад, до зараження або одужання, залежно від розроблених правил і ймовірностей, що відображають реальні процеси поширення захворювання.

Завдяки такій моделі можна виявляти і досліджувати механізми поширення інфекцій в популяції, оцінювати ефективність різних заходів боротьби з епідемією та прогнозувати динаміку розвитку інфекційної хвороби в реальному часі, враховуючи індивідуальні характеристики та взаємодії агентів.

Інтеграція з моделлю поширення інфекцій. Для моделювання поширення інфекцій в обраній мультиагентній системі було вибрано математичну модель SIR (вразливість, інфікованість, вилікування). Ця модель дозволяє ефективно відтворювати динаміку епідемії серед агентів, де кожен агент може перебувати в одному з трьох станів: вразливий (S), інфікований (I) або вилікований (R).

Інтеграція моделі SIR у мультиагентну систему здійснюється шляхом визначення ймовірностей переходів між цими станами залежно від взаємодій між агентами, таких як контакти, передачі інфекції, та інші фактори, які впливають на швидкість зараження та вилікування. Цей підхід дозволяє моделювати не лише поширення інфекції, але й враховувати вплив таких параметрів, як соціальні контакти, карантинні заходи та швидкість реакції на епідемію.

Для створення **інтерактивної візуалізації** було обрано мову програмування Java з використанням JavaFX у поєднанні з бібліотекою GeoFX. Це рішення обумовлене потребою у динамічному, графічному відображенні процесів, що відбуваються у системі, зокрема переміщення агентів, зміни їхніх статусів та просторове поширення інфекції. JavaFX забезпечує можливість створення гнучкого та масштабованого графічного інтерфейсу, а GeoFX дозволяє ефективно працювати з геопросторовими даними, включаючи відображення координат, нанесення шарів з результатами моделювання, а також інтеграцію з зовнішніми джерелами картографічної інформації.

Візуалізація відіграє не лише демонстраційну функцію, але й є інструментом аналітики: за допомогою карти можна відстежувати часову динаміку поширення захворювання, виділяти зони з підвищеним ризиком, оцінювати ефективність запроваджених заходів впливу, таких як соціальне дистанціювання чи вакцинація. Таким чином, вибір JavaFX з GeoFX дозволяє поєднати точність просторової моделі з можливістю наочного представлення її результатів, що суттєво розширює потенціал системи для досліджень та прийняття управлінських рішень.

Розглянемо гіпотетичний сценарій поширення інфекційного захворювання в умовах середнього за розміром міського середовища. На рисунку 1 подано модель просторового розміщення агентів (домогосподарств), де центральний червоний маркер представляє "нульового пацієнта", з якого починається інфекція, зелені — здорові агенти. Ця модель дозволяє проаналізувати характер поширення захворювання залежно від щільності населення та просторової структури контактів.

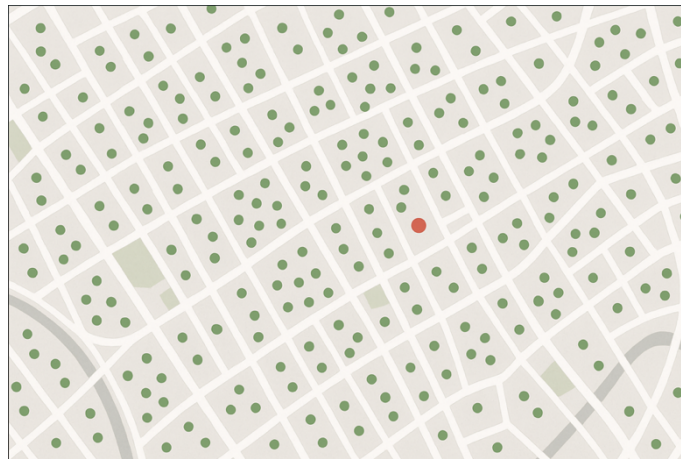


Рис. 1. Одиначне зараження в центральній області.

На рис.2 спостерігається формування локалізованого епідемічного осередку в центральній частині міста, де зафіксовано високу концентрацію інфікованих осіб. Така ситуація характерна для середовищ із щільною забудовою та інтенсивною соціальною взаємодією, що сприяє швидкій трансмісії інфекції. У моделюванні враховано як прямі контакти між агентами, так і фактори просторової близькості, що підсилює ефект кластера.

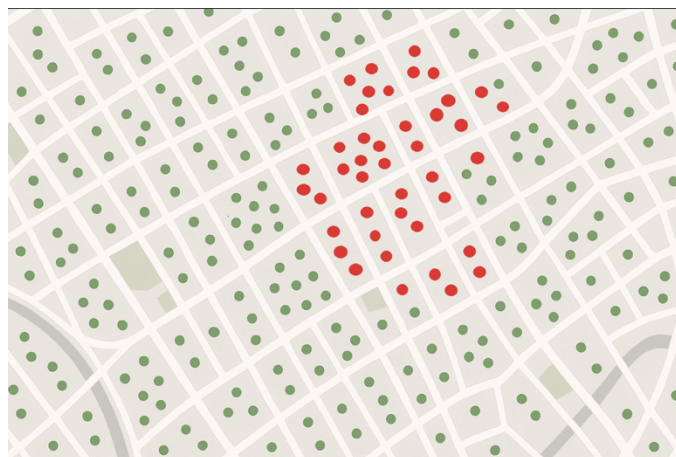


Рис. 2. Проміжна фаза поширення інфекції.

Інший сценарій — коли "нульовий пацієнт" знаходиться не в центрі, а ближче до одного з країв регіону (Рис.3).



Рис. 3. Одиначне зараження в центральній області.

Зараження починається з правого боку карти і поступово поширюється вглиб середовища. Такий сценарій є особливо важливим для досліджень, де джерело інфекції може бути занесене із зовнішнього середовища. Він дозволяє оцінити асиметричність розповсюдження та потенційний вплив локалізованих заходів контролю. На рис.4 зображено модель саме такого сценарію.

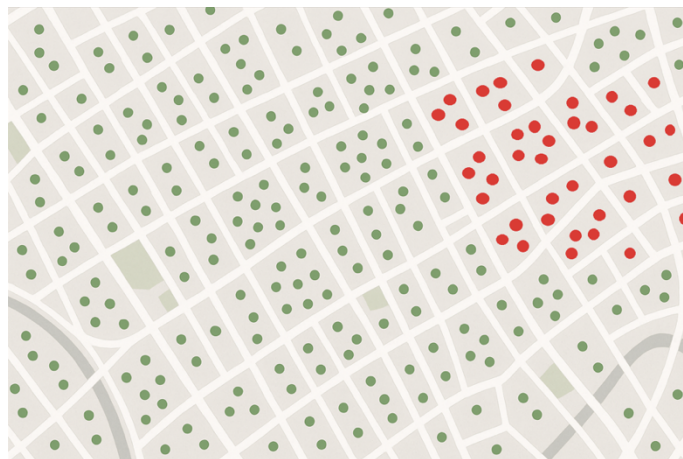


Рис. 4. Поширення інфекції з периферії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній роботі було розроблено багатопараметричну мультиагентну систему моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань, яка поєднує класичні епідеміологічні підходи з гнучкістю агентно-орієнтованого моделювання. Запропонована система дозволяє враховувати індивідуальні властивості агентів, їхню мобільність, соціальну поведінку та геопросторовий контекст, що суттєво підвищує точність і реалістичність моделювання. Інтеграція адаптованої SIR-моделі до мультиагентної архітектури дала змогу ефективно описувати процеси зараження, одужання та формування імунітету на рівні окремих агентів. Використання JavaFX та бібліотеки GeoFX забезпечило створення візуалізаційного модуля, який дозволяє наочно аналізувати поширення інфекції у просторі й часі, ідентифікувати критичні зони та досліджувати динаміку під впливом різних сценаріїв інтервенції.

Проведені симуляційні експерименти підтвердили здатність моделі точно відображати як централізовані, так і периферійні сценарії початку інфекції, а також їхній вплив на загальну динаміку епідемії. Модель демонструє потенціал як інструмент дослідження складних епідеміологічних ситуацій, так і як платформа для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері охорони громадського здоров'я. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності моделі, включаючи адаптивне навчання агентів, інтеграцію реальних

демографічних та мобільних даних, а також впровадження додаткових типів інтервенцій, таких як вакцинація або тестування з ізоляцією.

Список бібліографічного опису:

1. Bădică, A., Bădică, C., Ganzha, M., Ivanović, M., & Paprzycki, M. "Multi-Agent Simulation of Core Spatial SIR Models for Epidemics Spread in a Population." 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9358293>
2. Yaroslav Vykylyuk, Denys Nevinskyi, Valentyna Chopyak, Olga Golubovska, Miroslav Škoda, Kateryna Hazdiuk. Modeling the spatial distribution of different strains of the COVID-19 virus based on the GeoSER(D) model. Viruses. 2023. No 15(12). 2299. <https://doi.org/10.3390/v15122299>
3. Liu et al. Modeling COVID-19 spread using multi-agent simulation with small-world network approach. BMC Public Health. 2024;24:672. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-18157-x>
4. Walsh Medical Media. Comparing Decision Tree-Based Ensemble Machine Learning Models for COVID-19 Death Probability Profiling. Journal of Health & Medical Informatics. <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/comparing-decision-treebased-ensemble-machine-learning-models-for-covid19-death-probability-profiling-62320.html>
5. Savarimuthu, B.T.R., & Cranefield, S. "Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems." Multiagent and Grid Systems, vol. 7, no. 1, pp. 21-54, 2021. [Online]. Available: <https://content.iospress.com/articles/multiagent-and-grid-systems/mgs00167>
6. Roche, B., Guégan, J.-F., & Bousquet, F. "Multi-agent systems in epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission." BMC Bioinformatics, vol. 9, 2018, p. 435. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2105-9-435>
7. Wang, Y., Ishii, H., Bonnet, F., & Défago, X. "Resilient Consensus for Multi-Agent Systems Under Adversarial Spreading Processes." IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 9780222, Sept.-Oct. 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9780222>
8. Bellomo, N., Brezzi, F., & Chaplain, M.A.J. "A multi-agent approach to the impact of epidemic spreading on commercial activities." Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 32, no. 10, pp. 1931-1948, 2022. [Online]. Available: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218202522500440>
9. Bădică, A., Bădică, C., Ganzha, M., Ivanović, M., & Paprzycki, M. "Multi-agent Spatial SIR-Based Modeling and Simulation of Infection Spread Management." Lecture Notes in Computer Science, vol. 12744, pp. 37-47, 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77967-2_37
10. Tian, C., Ding, W., & Cao, R. "Extensive Epidemic Spreading Model Based on Multi-agent System Framework." Lecture Notes in Computer Science, vol. 4490, pp. 17-28, 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72590-9_17

References:

1. Bădică, A., Bădică, C., Ganzha, M., Ivanović, M., & Paprzycki, M. "Multi-Agent Simulation of Core Spatial SIR Models for Epidemics Spread in a Population." 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9358293>
2. Yaroslav Vykylyuk, Denys Nevinskyi, Valentyna Chopyak, Olga Golubovska, Miroslav Škoda, Kateryna Hazdiuk. Modeling the spatial distribution of different strains of the COVID-19 virus based on the GeoSER(D) model. Viruses. 2023. No 15(12). 2299. <https://doi.org/10.3390/v15122299>
3. Liu et al. Modeling COVID-19 spread using multi-agent simulation with small-world network approach. BMC Public Health. 2024;24:672. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-18157-x>
4. Walsh Medical Media. Comparing Decision Tree-Based Ensemble Machine Learning Models for COVID-19 Death Probability Profiling. Journal of Health & Medical Informatics. <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/comparing-decision-treebased-ensemble-machine-learning-models-for-covid19-death-probability-profiling-62320.html>
5. Savarimuthu, B.T.R., & Cranefield, S. "Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems." Multiagent and Grid Systems, vol. 7, no. 1, pp. 21-54, 2021. [Online]. Available: <https://content.iospress.com/articles/multiagent-and-grid-systems/mgs00167>
6. Roche, B., Guégan, J.-F., & Bousquet, F. "Multi-agent systems in epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission." BMC Bioinformatics, vol. 9, 2018, p. 435. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2105-9-435>
7. Wang, Y., Ishii, H., Bonnet, F., & Défago, X. "Resilient Consensus for Multi-Agent Systems Under Adversarial Spreading Processes." IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 9780222, Sept.-Oct. 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9780222>
8. Bellomo, N., Brezzi, F., & Chaplain, M.A.J. "A multi-agent approach to the impact of epidemic spreading on commercial activities." Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 32, no. 10, pp. 1931-1948, 2022. [Online]. Available: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218202522500440>
9. Bădică, A., Bădică, C., Ganzha, M., Ivanović, M., & Paprzycki, M. "Multi-agent Spatial SIR-Based Modeling and Simulation of Infection Spread Management." Lecture Notes in Computer Science, vol. 12744, pp. 37-47, 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77967-2_37
10. Tian, C., Ding, W., & Cao, R. "Extensive Epidemic Spreading Model Based on Multi-agent System Framework." Lecture Notes in Computer Science, vol. 4490, pp. 17-28, 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72590-9_17