

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 8247
Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
доктору фізико-математичних наук,
професору Ігорю МАЛИКУ

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента

доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення,
доцента, завідувача кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Газдюк Катерини Петрівни

на дисертаційну роботу аспіранта Косовича Ігоря Тарасовича
«Моделювання прогнозування поширення епідемій методами рухомих клітинних
автоматів та навчанням з підкріпленням»
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 113 – «Прикладна математика»

Актуальність теми та зв'язок з науковими планами та програмами

Дисертаційна робота присвячена математичному моделюванню поширення інфекційних захворювань із застосуванням класичних епідеміологічних моделей, клітинних автоматів та методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, з метою розробки ефективних стратегій протиепідемічного реагування. Математичні моделі зазвичай використовуються не лише для перевірки гіпотез, розроблених на основі експериментальних даних, але й для прогнозування нових явищ і закономірностей, які можуть бути виявлені при тестуванні цих моделей. Такий підхід особливо важливий в тих сферах досліджень, де проведення реальних експериментів над об'єктами є складним або неможливим, наприклад, в епідеміології. Проблема поширення різноманітних інфекцій і епідемій є глобальним викликом для людства, що робить актуальною задачу побудови математичних моделей, які дозволяють зрозуміти динаміку епідемій, оцінювати ефективність контролю за захворюваннями і розробляти плани дій для боротьби з ними.

Актуальність обраної тематики є безперечною з огляду на виклики сучасності, пов'язані з глобальними епідеміями, зокрема пандемією COVID-19. Прогнозування і аналіз поширення інфекційних захворювань вимагає адекватних моделей, які здатні не лише описати епідемічні процеси, але й враховувати вплив соціальних, просторових, поведінкових та політичних чинників. Класичні підходи (SIR-моделі) хоч і є широко поширеними, мають обмежену здатність до моделювання індивідуалізованих сценаріїв у гетерогенному середовищі.

Дисертація вирішує це завдання шляхом використання клітинних автоматів та методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, що дозволяє реалізовувати адаптивне управління процесами поширення інфекції. Особливої ваги роботі додає застосування сучасних програмних інструментів, зокрема розробка веб-застосунку, що дає змогу наочно демонструвати результати моделювання в інтерактивному середовищі.

Таким чином, тема дисертації не лише відповідає нагальним потребам сучасної науки і практики, а й має значний міждисциплінарний потенціал, а актуальність тематики дисертаційної роботи Косовича Ігоря Тарасовича не викликає сумнівів.

Структура та зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота логічно структурована, має чітко окреслену мету, предмет і об'єкт дослідження. Вона складається із вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел (145 найменувань) і трьох додатків. Загальний обсяг – 190 сторінок.

У **першому** розділі здійснено всебічний аналіз сучасних підходів до математичного та імітаційного моделювання епідемій, зокрема проаналізовано диференціальні моделі (типу SIR), імітаційне агентне моделювання, а також методи машинного навчання. Особливо цінним є детальний огляд літератури, присвяченої методу клітинних автоматів, який останнім часом набуває все більшої популярності в епідеміологічних дослідженнях завдяки своїй гнучкості та здатності моделювати складні просторові взаємодії. Окрема увага приділяється аналізу доступного програмного забезпечення для моделювання епідеміологічних процесів.

Другий розділ присвячено математичному аналізу класичної SIR-моделі, її модифікацій та реалізації через клітинні автомати.

У п.2.1 здійснено детальний опис математичної SIR-моделі, включаючи аналіз базових припущень, побудову системи диференціальних рівнянь та

дослідження її математичних властивостей. Отримані автором результати щодо існування та єдності розв'язку SIR-моделі, а також аналіз граничних властивостей розв'язків, є важливим внеском у теоретичну епідеміологію. Ці результати дозволяють глибше зрозуміти динаміку поширення інфекційних захворювань та оцінити межі застосовності класичних моделей.

У п.п. 2.2-2.3 другого розділу розглядається застосування клітинних автоматів для моделювання поширення епідемій. Детально описано модифікації SIR-моделі на основі клітинних автоматів, що дозволяють врахувати просторові фактори, індивідуальні відмінності між агентами та різні сценарії реагування на епідемію (карантин, вакцинація, масковий режим тощо). Запропонована функціональна схема моделювання наведених сценаріїв, яка забезпечує можливість динамічно змінювати характеристики агентів, вводячи нових або видаляючи наявних агентів у режимі дійсного часу під час імітаційного експерименту, зберігати та відновлювати дані.

У третьому розділі детально описано застосування методів навчання з підкріпленням для визначення ефективних стратегій соціального дистанціювання. Основною метою цього підходу є знаходження оптимальних дій для досягнення довгострокової винагороди. У роботі розроблено SIHRD-модель, яка є суттєвим розширенням класичної SIR-моделі за допомогою алгоритму Advantage Actor-Critic (A2C). У навчанні з підкріпленням ця модель виступає як середовище, у якому агент приймає рішення щодо оптимальної політики втручання. На основі зміни у динаміці пандемії система оцінює ефективність ухвалених рішень, а агент отримує винагороду залежно від результату.

Четвертий розділ має прикладний характер – представлено веб-застосунок, реалізований за допомогою сучасних технологій (React, FastAPI, REST API), здійснено його тестування, описано архітектуру та можливості масштабування. Функціонал даного застосунку дозволяє користувачу здійснювати вибір моделі для симуляції, при цьому розрахунки проводяться на серверній частині, а відображення отриманих результатів відбувається у зручному для користувача форматі.

Наукова новизна та значення результатів

Дисертація має високий рівень наукової обґрунтованості, що підтверджується детальним теоретичним аналізом, математичною строгістю, чисельними експериментами та відповідністю процесам у біологічних системах, забезпечуючи її достовірність і практичну значущість. Дисертантом отримано

наступні наукові результати:

1. Доведено математичні властивості класичної SIR-моделі Кермака–Маккендріка, зокрема існування та єдиність розв'язку при початкових умовах, що підтверджує коректність її використання в моделюванні.
2. Запропоновано модифікацію SIR-моделі з урахуванням просторових факторів, реалізовану через клітинні автомати із визначеними правилами взаємодії агентів.
3. Побудовано функціональну схему моделювання сценаріїв протиепідемічних заходів (ізоляція, маски, вакцинація, тощо), що дає змогу порівнювати їх ефективність.
4. Запропоновано SIHRD-модель як середовище для застосування алгоритмів навчання з підкріпленням, що дозволяє адаптивно керувати процесами пандемії.
5. Реалізовано адаптацію до епідеміологічних задач Actor-Critic (A2C) та Deep Q-Learning на базі фреймворку PyTorch.
6. Розроблено та протестовано інтерактивний веб-застосунок, що дозволяє користувачам самостійно моделювати сценарії, змінювати параметри та отримувати візуалізацію.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота носить переважно теоретичний характер і спрямована на вирішення актуальних задач математичного моделювання поширення епідемій. Отримані результати є конструктивними та підтверджують високу ефективність математичних моделей для виявлення і прогнозування закономірностей розвитку епідеміологічних процесів. Запропоновані методики та моделі демонструють значний потенціал у вирішенні практичних завдань, пов'язаних з плануванням та реалізацією заходів боротьби із поширенням інфекційних захворювань.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості застосування її результатів органами місцевого самоврядування та державними структурами охорони здоров'я. Запропоновані підходи можуть бути використані для більш точного прогнозування динаміки поширення вірусних захворювань та ефективної оптимізації впроваджуваних обмежувальних заходів, що є надзвичайно актуальним у контексті боротьби з пандеміями та епідеміями.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати дисертації досить повно висвітлені у чотирьох наукових статтях. Дві з цих статей опубліковані у вітчизняних наукових журналах, які входять до категорії "Б" переліку наукових видань України, а ще дві – у міжнародних виданнях, що індексуються у наукометричній базі "Scopus". Окрім того, наукові результати були апробовані у доповідях та обговореннях на шести всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях. У дисертації чітко визначено особистий внесок автора у дослідженнях, опублікованих у співавторстві.

Загалом, дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам щодо кількості та якості публікацій у фахових виданнях, а також відповідає нормативним критеріям обсягу та оформлення наукових досліджень цього рівня.

Зауваження та дискусійні положення

Разом із загально позитивною оцінкою, слід зазначити певні зауваження та побажання, які можуть бути корисними для подальших досліджень:

1. Варто було б додатково провести аналіз масштабування досліджуваних моделей, розглянувши зміну поведінки моделей при переході від локального до регіонального чи національного рівнів.
2. Бажано розширити кількість сценаріїв моделювання, враховуючи додаткові фактори, такі як нерівномірне впровадження обмежень, зміна поведінки населення, міграційні потоки та інші соціальні аспекти.
3. Визначення функції винагороди, яка повинна адекватно балансувати між різними, часто суперечливими цілями (мінімізація захворюваності, смертності, економічних втрат, соціальних обмежень) є складним завданням. Бажано було б детальніше описати обґрунтування процесу вибору функції винагороди у випадку довгострокової перспективи.
4. Недостатньо обґрунтований вибір алгоритмів навчання з підкріпленням. Не зрозуміло, чи враховувалися особливості задачі: розмірність простору дій, вимоги до швидкості моделювання та чи проводився порівняльний аналіз з іншими підходами, що використовуються у цій галузі.
5. Документування коду розробленого програмного застосунку. Хоча додатки містять вихідні файли, відсутня повноцінна інструкція з розгортання та опис API-ендпоїнтів, що ускладнює можливості повного його використання сторонніми дослідниками.

Загальний висновок.

Оцінюючи дисертаційну роботу «Моделювання прогнозування поширення епідемій методами рухомих клітинних автоматів та навчанням з підкріпленням» в цілому, є всі підстави стверджувати, що за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень і науковою новизною та цінністю одержаних в ній результатів і науково-теоретичним рівнем їх обґрунтованості вона цілком відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор Косович Ігор Тарасович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика» в галузі знань 11 – «Математика та статистика».

Офіційний рецензент,
доктор філософії за спеціальністю 121
Інженерія програмного забезпечення,
доцент, завідувач кафедри
програмного забезпечення
комп'ютерних систем
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Катерина ГАЗДЮК

Підпис *Газдюк К.* засвідчую
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Дирдовська Н.
"12" травня 2025

