

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

Рецензія

офіційного рецензента

на дисертаційну роботу 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.

На даний час найбільш ефективним підходом дослідження складних процесів у фізичних та біологічних системах стає математичне моделювання. Однією з найбільш важливих сфер застосування математичного моделювання є епідеміологія, де моделювання дозволяє не лише аналізувати вже наявні дані, а є критичним інструментом для розуміння та передбачення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань. Сучасні математичні моделі дають чіткий сценарій розвитку тієї чи іншої епідемії враховуючи різноманітні фактори та параметри, такі як щільність населення, вакцинація населення, наявність інкубаційного періоду у захворювання, кількість контактів, здатність імунітету боротися із захворюванням, запровадження карантину тощо.

Найпростіші SIR моделі епідемій засновані на класифікації живих індивідуумів в популяції як сприйнятливих, інфекційних та одужавших або померлих є системами диференціальних рівнянь. Вони мають ряд недоліків: моделі є неперервними, тоді як процес поширення інфекції – дискретний; не враховуються індивідуальні властивості об'єктів; у моделях присутні

«усереднені» параметри значення яких важко або неможливо визначити виходячи із даних статистики.

У зв'язку з цим необхідно розвивати адекватні комп'ютерні моделі розвитку імітаційних моделей поширення епідемій, які забезпечать розуміння складної динаміки поширення захворювання та розроблення ефективних методів стримування та зупинки епідемії.

Актуальність дисертаційної роботи Ігоря Тарасовича Косовича визначається саме цим викликом. У своїй роботі автор поєднує методи клітинних автоматів з алгоритмами навчання з підкріпленням, що дає змогу будувати адаптивні, агентно-орієнтовані моделі поширення інфекцій. Імітаційне моделювання з використанням мультиагентного методу дозволяє, задавшись початковими параметрами за кожним типом об'єктів і системою правил взаємодії один з одним і довкіллям, виявити динамічні закономірності розвитку інфекції і найбільш суттєві властивості агентів, що сприяють зміні темпів поширення. Такий підхід дозволяє враховувати неоднорідність контактних структур, поведінкові особливості населення та динамічні зміни середовища, забезпечуючи високу точність прогнозування.

Результати дослідження мають не лише теоретичне, а й практичне значення. Запропоновані моделі можуть лягти в основу цифрових систем епідеміологічного моніторингу, підтримки прийняття рішень, логістики медичних ресурсів і планування превентивних заходів. Здатність моделі швидко інтегрувати статистичні та мобільні дані відкриває нові можливості для ефективного управління епідеміями, зменшуючи економічні та соціальні наслідки для суспільства.

Дослідження дисертаційної роботи виконані в рамках держбюджетної наукової теми "Математичне та комп'ютерне моделювання динамічних процесів, що описуються детермінованими і стохастичними диференціально-функціональними та еволюційними рівняннями, і їх застосування" кафедри математичного моделювання факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (номер держреєстрації 0120U105712).

Загальна характеристика роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (145 найменувань) та трьох додатків.

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, висвітлюється зв'язок роботи з науковими програмами, мета і основні задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок автора в їх отримання та список конференцій і наукових семінарів, на яких дисертаційна робота пройшла апробацію.

У першому розділі наведено історичний та методичний аналіз літератури за тематикою дисертації, здійснено аналіз сучасних підходів до математичного та імітаційного моделювання епідемій, особливу увагу приділяючи методу клітинних автоматів і SIR-моделям. Достатньо повно висвітлюються сучасні дослідження по застосуванню машинного навчання та роль штучного інтелекту в управлінні пандемією, демонструючи, як алгоритми машинного навчання можуть допомагати у точному прогнозуванні розвитку пандемії, автоматизації діагностичних процесів і моніторингу соціальних контактів для стримування вірусу.

Огляд наявних інструментів застосування інформаційних технологій в епідеміології, таких як NetLogo, Epigrass та GLEaMviz, доповнює систематизацію підходів та дозволяє чітко окреслити проблемне поле для подальших досліджень.

Другий розділ зосереджений на моделюванні COVID-19 за допомогою класичних диференціальних моделей та клітинних автоматів. Показано, що математичні моделі є потужним інструментом для розуміння поширення епідемій. Ці моделі імітують динаміку поширення вірусних хвороб серед населення та дозволяють планувати політику щодо заходів боротьби з інфекційними захворюваннями, але вказується, що ефективність їх застосування можлива для аналізу поведінку динаміки захворювання на макрорівні.

Головна увага досліджень у другому розділі роботи направлена на розвинення алгоритмів та методик для математичного моделювання поширення хвороби шляхом розробки гібридних підходів до моделювання. Розроблено

модифіковані SIR-моделі, які можуть відображати просторову структуру та індивідуальні особливості агентів. Запропонована динамічна схема моделювання з можливістю зміни характеристик агентів у реальному часі дозволяє ефективно прогнозувати наслідки різних заходів (локдаун, вакцинація, масковий режим) підтверджена чисельними експериментами.

У третьому розділі розглядається застосування машинного навчання та навчання з підкріпленням для моделювання епідемій. Цей підхід природно відповідає задачі управління епідемією, де ціллю є оптимізація стратегій втручання (наприклад, соціальне дистанціювання, тестування, лікування) для досягнення найкращого балансу між стримуванням поширення інфекції та мінімізацією соціально-економічних збитків. В роботі запропоновано розроблену SIHRD-модель в якості середовища моделювання для розширення класичної SIR-моделі у зв'язці з алгоритмом A2C, що дозволяє агенту навчатися оптимальної стратегії втручання на основі конфігурації параметрів навчання та структури середовища. Застосування алгоритму A2C продемонструвало його високу ефективність у моделюванні поширення інфекційних захворювань та визначенні оптимальних стратегій обмежувальних заходів.

У завершальному четвертому розділі представлено розроблений веб-застосунок, що забезпечує інтерактивне моделювання та візуалізацію результатів, з акцентом на гнучкість, точність та зручність для користувача. Основною метою даного застосунку є забезпечення можливості вибору моделі для моделювання, графічну візуалізацію динаміки захворюваності, можливість порівняння різних сценаріїв моделювання, а також аналіз впливу зміни параметрів на перебіг епідемії. Клієнтська частина реалізована на базі технології React із використанням JavaScript, що забезпечує динамічність типізації, покращену читабельність коду та мінімізацію помилок. Для маршрутизації застосовується React Router, що дозволяє динамічно переміщуватися між сторінками без повного перезавантаження сторінки. Додаток має потенціал для подальшого вдосконалення, що може розширити сферу його застосування та підвищити точність результатів моделювання.

Основні результати роботи:

1. Розроблено гібридну модель РКА-НП для моделювання епідемій, яка, на відміну від традиційних підходів, дозволяє поєднувати деталізацію просторово-часової динаміки, що забезпечується РКА, з адаптивністю управління, яку пропонує НП.
2. Створено удосконалену модель РКА, в якій агенти (клітини) наділені не лише станами (сприйнятливий, інфікований, одужалий), але й індивідуальними характеристиками (вік, мобільність, соціальна активність), що дає змогу моделювати складні взаємодії та просторовий розподіл інфекції.
3. Реалізовано фреймворк на основі навчання з підкріпленням, призначений для автоматизованого пошуку оптимальних стратегій реагування на епідеміологічні виклики. Цей фреймворк, використовуючи середовище моделі РКА дає змогу знаходити адаптивні політики, що враховують баланс між медичними та соціально-економічними пріоритетами.
4. Проведено комплексне порівняльне дослідження, яке продемонструвало значні переваги запропонованого гібридного підходу над класичними епідеміологічними моделями (типу SIR/SEIR). Показано, що розроблена методологія забезпечує більш адекватне відображення реальних епідемічних процесів завдяки врахуванню неоднорідностей, просторової структури та поведінкових факторів.
5. Розроблено програмний комплекс, що реалізує гібридну модель РКА-НП. Цей комплекс є цінним інструментом для наукових досліджень в епідеміології, а також може слугувати основою для створення систем підтримки прийняття рішень у сфері охорони здоров'я.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації та їх достовірності

Дисертаційна робота Ігоря Тарасовича Косовича має значну наукову та практичну новизну. Вона полягає у розробці гібридного підходу до моделювання епідемій, що поєднує класичні моделі з рухомими клітинними автоматами та

навчанням з підкріпленням. Такий підхід, а також модифікація SIR-моделі, дозволяють детальніше врахувати гетерогенність, просторовість та індивідуальні взаємодії, а застосування навчання з підкріпленням – аналізувати стратегії реагування на епідемії.

Обґрунтованість положень підтверджується ретельним аналізом, описом моделей та чисельними експериментами. Достовірність результатів забезпечується багаторазовими симуляціями з різними параметрами. Розроблені програмні інструменти мають теоретичну та практичну цінність.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота має важливе теоретичне значення, оскільки в ній розроблено новий гібридний підхід до моделювання епідемій. Цей підхід поєднує рухомі клітинні автомати та навчання з підкріпленням, що розширює можливості комп'ютерного моделювання та штучного інтелекту.

Практичне значення дослідження полягає у створенні інструментів для аналізу та управління епідемічними процесами. Розроблені моделі та програмний комплекс можуть допомогти органам охорони здоров'я прогнозувати поширення захворювань та оптимізувати стратегії втручання.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертації достатньо повно висвітлені у 4 наукових статтях. Дві з цих статей опубліковані у вітчизняних наукових журналах, які входять до категорії "Б" переліку наукових видань України та ще дві – у міжнародних виданнях, що індексуються у наукометричній базі "Scopus". 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.

Дискусійні зауваження та побажання .

1. В огляді літератури можна було б приділити більше уваги сучасним дослідженням гібридних підходів, що поєднують різні методи моделювання.
2. Бажано було б розроблені в розділах 2 та 3 алгоритми для моделювання епідемій подати у вигляді наглядних блок-схем, або детальніше їх формалізувати.
3. Обґрунтування вибору параметрів навчання (функція винагороди, параметри алгоритму) потребує додаткових пояснень. Аналіз чутливості результатів моделювання до зміни параметрів потребує розширення.
4. Було б варто провести порівняльний аналіз ефективності розробленого прикладного застосунку із існуючими програмними застосунками для моделювання епідеміологічних процесів.
5. Недостатня увага в роботі приділена до вимог обчислювальних ресурсів. Використання методів машинного навчання вимагає значних обчислювальних потужностей.
6. У дисертаційній роботі вказується на можливість впровадження розроблених схем та алгоритмів моделювання, однак доцільно було б більше уваги приділити практичному використанню результатів в медичній системі.
7. Не вистачає порівняння розробленого додатку з існуючими аналогами.
8. Потребує більш детального опису процес розгортання та тестування додатку.
9. Дисертаційна робота добре стилістично і грамотно оформлена, хоча і містить незначну кількість технічних неточностей.

Загальний висновок

Загалом, дисертація Ігоря Тарасовича Косовича являє собою завершену наукову працю, в якій представлено важливі та наукові результати з практичною цінністю. 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».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних наук

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича



Дмитро УГРИН

