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

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу аспіранта *Косовича І.Т.*

«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.

Моделювання біологічних систем є одним із найактуальніших напрямків сучасного математичного моделювання. Зазвичай математичні моделі використовуються не тільки для перевірки гіпотез, розроблених на основі експериментальних даних, але й для передбачення нових явищ та закономірностей, які можна виявити при тестування цих моделей. Особливо незамінне воно в тих областях досліджень, де реальні експерименти над об'єктами ускладнені або просто неможливі. Прикладом однієї з таких областей являється епідеміологія. Проблема поширення різного роду інфекцій і епідемій є актуальною для усього людства. В умовах пандемії коронавірусу важливо виявити закономірності та характеристики розповсюдження інфекції для того, щоб застосовувати ефективні засоби захисту та боротьби із нею.

Дисертаційна робота Косовича І. Т. присвячена дослідженню та побудові алгоритмів математичного та імітаційного моделювання епідемічних процесів з акцентом на використання обчислювальних ресурсів та методів машинного навчання для прогнозування та контролю поширення інфекційних захворювань. 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). Реалізація запропонованих в роботі методів та алгоритмів здійснена у вигляді прикладного Веб-додатоку, який надає практичний інструментарій для аналізу та прогнозування динаміки інфекцій.

Наявність складних і цікавих теоретичних та практичних проблем, пов'язаних із вивченням розглядуваних в роботі задач, пояснює інтерес до їх дослідження і в силу цього тема дисертаційної роботи є важливою і актуальною.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку умовних позначень, списку використаних джерел (145 найменувань) та трьох додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано мету, задачі й методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробацію тощо.

Досить детальний огляд робіт, що є близькими до теми дисертації та методичний аналіз методів розв'язання досліджуваних в роботі задач, наведено у **першому розділі** дисертаційної роботи. Відзначимо тут грунтовний аналіз робіт стосовно історичної хронології досліджень математичних SIR моделей.

У першому розділі дисертації також наведений достатньо повний огляд результатів інших авторів, по застосуванню методу КА до різноманітних просторово розподілених динамічних процесів та систем, що підтверджує його гнучкість та зручність для моделювання інфекцій із великою кількістю різних обмежень. Здійснено аналіз найбільш поширеного програмного забезпечення процесів, наведено приклади їх використання.

Відзначимо систематичний аналіз останніх досягнень по застосуванню методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, дозволяє не лише спрогнозувати прояви інфекційної хвороби, а й вивчати динаміку

поширення та запропонувати ефективні стратегії мінімізації впливу пандемії на суспільство та економіку.

Дослідження поширення епідеміологічних процесів з використанням математичного моделювання та імітаційного моделювання методом клітинних автоматів розглянуто у **другому розділі** роботи.

Цікаві результати одержані для класичної SIR моделі Кермака–Маккендріка, яка описує динаміку інфекційного захворювання на макрорівні. Відзначимо наведений аналіз базових припущень та детальну схему побудови SIR моделі. Дослідження математичних властивостей функцій, що описують SIR модель, дозволили встановити існування та єдиність розв'язку задачі Коші для моделі Кермака–Маккендріка та одержати граничні властивості її розв'язків які дозволяють оцінити екстремальні параметри захворювання.

Перевагою цієї SIR моделі є те, що вона достатньо адекватно описує поведінку епідеміологічних процесів на макрорівні. При цьому не враховуються індивідуальні властивості об'єктів, оскільки процес поширення інфекції дискретний та неможливо передбачити наслідки індивідуальної поведінки суб'єктів та системи обмежувальних заходів, які активно впроваджуються.

Як альтернативний метод для моделювання поширення епідемії у другому розділі використовується метод клітинних автоматів. Важливим аспектом методу клітинних автоматів є використання локалізації. Оскільки клітинки оновлюються на основі своїх сусідів, це ідеально підходить для моделювання інфекцій за рахунок правил переходу, які можуть враховувати ймовірність і близькість контакту між інфікованими та сприйнятливими особами. В роботі запропоновано модифікації SIR-моделі, що базуються на адаптації правил взаємодії агентів, урахування поведінки та впливу різних подразників і факторів зовнішнього середовища (вплив маскового режиму, вплив вакцинації, обмеження соціальної взаємодії під час піку епідемії або самоізоляція у випадку зараження).

Для реалізації алгоритму імітаційного моделювання та прийняття рішень у роботі запропоновано функціональну схему, яка забезпечує можливість динамічно змінювати характеристики агентів, вводячи нових або видаляючи наявних агентів у режимі дійсного часу під час імітаційного експерименту,

зберігаючи та відновлюючи дані. Результати моделювання показують, що поєднання вакцинації, маскового режиму та самоізоляції дозволяє суттєво зменшити пікове навантаження на систему охорони здоров'я та розтягнути епідемічний процес у часі, що є критично важливим для зменшення негативних наслідків пандемії.

У **третьому розділі роботи** досліджуються методи машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, для моделювання та аналізу епідеміологічних процесів. Запропоновано SIHRD-модель як середовище моделювання, що розширює класичну SIR-модель за допомогою алгоритму Advantage Actor-Critic (A2C) для оптимізації прийняття рішень у задачах моделювання поширення ефективність дії агента в певному стані. Вона є ключовим елементом процесу навчання, оскільки агент оптимізує свої рішення, прагнучи максимізувати сумарну винагороду в довгостроковій перспективі. Завдяки багаторазовим взаємодіям із середовищем агент навчається знаходити оптимальні рішення, що мінімізують ризики або максимізують ефективність управління процесом.

У четвертому розділі роботи представлено опис розробленого прикладного веб-додатку для моделювання поширення інфекцій, що дозволяє користувачам в інтерактивному режимі обирати модель для моделювання, налаштовувати її параметри, задавати початкові умови та аналізувати результати у зручному графічному форматі. Розроблений веб-додаток дає змогу дослідникам та спеціалістам проводити моделювання поширення інфекцій з використанням зручного інтерфейсу та можливістю налаштування параметрів.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації та їх достовірності.

Дисертація містить ряд нових цікавих результатів, що розв'язують важливі проблеми щодо побудови та обґрунтування алгоритмів та методик для математичного та імітаційного моделювання поширення інфекційних захворювань. Основний акцент роботи це класичні епідеміологічні моделі та сучасні обчислювальні алгоритми на базі алгоритмів клітинних автоматів і методів машинного навчання з підкріпленням та створення прикладного

програмного додатку, що дає практичний інструментарій для аналізу та прогнозування динаміки інфекцій. На відміну від класичних математичних моделей, які розглядають популяцію як однорідне середовище, підхід на основі клітинних автоматів дозволяє моделювати індивідуальні взаємодії між агентами, що наближує модель до реальних умов. Це особливо важливо для аналізу сценаріїв, де велике значення має географічне поширення інфекції, міграційні процеси та локальні осередки спалахів. Стійкість запропонованих в роботі сценаріїв моделювання епідеміологічного процесу була підтверджена шляхом багаторазового запуску симуляцій із різними початковими параметрами. Це свідчить про надійність моделей та можливість її застосування для прогнозування динаміки епідемій у реальних умовах. Застосування машинного навчання з підкріпленням дозволяє проаналізувати можливі рівні дистанціювання при пандемії та вибрати оптимальні стратегії соціального дистанціювання, які є найбільш доцільними для реального застосування.

Дисертаційна робота Косовича І.Т. має чітку та логічну структуру і є цілісним та завершеним науковим дослідженням.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів. Дисертація у першу чергу є теоретичним дослідженням. Результати отримані в дисертації є конструктивними, ілюструють важливе значення та потенціал математичного моделювання для вивчення закономірностей розповсюдження епідемій та планування політики щодо заходів боротьби з ними.

Результати роботи можуть бути рекомендовані органам місцевого самоврядування для аналізу прогнозування динаміки поширення вірусних захворювань та оптимізації обмежувальних заходів стримування пандемій.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Результати дисертації достатньо повно опубліковані у 4 наукових статтях, з яких 2 статті належать до переліку наукових видань України категорії "Б", а дві належать до міжнародної наукометричної бази "Scopus". Наукові результати апробовані в матеріалах 6 всеукраїнських та міжнародних наукових конференцій. У дисертації для опублікованих у співавторстві робіт визначено особистий внесок дисертанта.

Дисертація відповідає встановленим вимогам щодо кількості публікацій за темою дисертації у фахових виданнях, а також щодо об'єму та оформлення дисертаційних робіт.

Зауваження і побажання.

Аналізуючи граничні значення розв'язків SIR моделі одержано вираз Imax для максимальної кількості інфікованих осіб (2.18). Даний вираз містить параметри α та β, які потрібно знаходити статистичними методами в кожному конкретному випадку, що не дозволяє ефективно оцінити величину Imax на практиці.

У моделі клітинних автоматів, що розглядається у дисертації, взаємодія між агентами ґрунтується на детермінованих, фіксованих правилах, однакових для всіх. Такий підхід спрощує реалізацію, але не враховує реальну соціальну неоднорідність. Введення стохастичності у правилах взаємодії або використання персональних профілів поведінки для різних типів агентів зробило б модель значно ближчою до реальності.

При моделюванні динамічних систем, особливо таких, як епідемії, початкові умови мають вирішальний вплив на перебіг процесу. Проте в роботі відсутній аналіз чутливості моделі до таких факторів:кількість стартових інфікованих осіб,випадкове розміщення інфікованих осіб на сітці з різною щільністю населення.

У третьому розділі дисертації для реалізації методів машинного навчання використовуються алгоритми A2C (Advantage Actor-Critic) та DQN (Deep Q-Network), але не обґрунтовано, чому саме ці методи були обрані серед багатьох доступних в reinforcement learning (наприклад, PPO, SAC, TRPO, DDPG).

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.

Відзначимо, що зазначені зауваження та побажання не мають принципового значення і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Загальний висновок. Оцінюючи дисертаційну роботу 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 дисертаційна робота Ігоря Тарасовича Косовича на тему «Моделювання прогнозування поширення епідемій методами рухомих клітинних автоматів та навчанням з підкріпленням» є завершеним науковим дослідженням, що вносить значний внесок у розвиток методів моделювання та прогнозування поширення епідемій з акцентом на використання сучасних обчислювальних ресурсів та методів штучного інтелекту для розуміння та контролю поширення інфекційних захворювань.

Дисертація є завершеною науковою працею, яка цілком відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 "Порядком 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 ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика» в галузі знань 11 – «Математика та статистика».

Офіційний опонент: доктор технічних наук, професор ,
професор кафедри комп'ютерних наук
та прикладної математики Національного університету
водного господарства та природокористування Андрій БОМБА