

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту фізики  
конденсованих систем,



Брик Т.М.

8 грудня 2021 р.

## АНТОВАНИЙ ЗВІТ

### про виконану роботу в рамках реалізації Проекту із виконання наукових досліджень і розробок

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДЛЯ ОПИСУ  
ПОШИРЕННЯ ІНФЕКЦІЙНОГО ЗАХВОРЮВАННЯ COVID-19: РОЛЬ  
ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПОПУЛЯЦІЇ, ГЕТЕРОГЕННОСТІ МЕРЕЖІ  
СОЦІАЛЬНИХ КОНТАКТІВ ТА СОЦІАЛЬНОГО ВІДГУКУ

**Назва конкурсу:** «Наука для безпеки людини та суспільства»

**Реєстраційний номер Проекту:** 2020.01/0338

**Підстава для реалізації Проекту з виконання наукових досліджень і розробок** (реєстраційний номер та назва Проекту) №2020.01/0338 «Комп'ютерне моделювання та теоретичні підходи для опису поширення інфекційного захворювання COVID-19: роль просторової неоднорідності популяції, гетерогенності мережі соціальних контактів та соціального відгуку»

Рішенням наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства» протокол від 16-17 вересня 2020 року №21

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проекту: 2020-2021 pp.

Початок – 27 жовтня 2020 р.

Закінчення – 15 грудня 2021 р.

Загальна вартість Проекту, грн.

2 044 922,00 (два мільйони сорок чотири тисячі дев'ятсот двадцять дві гривні 00 копійок)

Вартість Проекту по роках, грн.:

1-й рік: 533 600,00 (п'ятсот тридцять три тисячі шістсот гривень 00 копійок)

2-й рік: 1 511 322,00 (один мільйон п'ятсот одинадцять тисяч триста двадцять дві гривні 00 копійок)

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проекту залучено 5 виконавців, з них:

доктори наук 3;

кандидати наук 2;

інші працівники -.

### **3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ**

Організації-субвиконавці не залучаються

#### **4. ОПИС ПРОЄКТУ**

**4.1. Мета Проєкту** (до 200 знаків): дослідити процес поширення епідемії COVID-19 за допомогою методів комп'ютерного моделювання та аналітичних теорій фізики складних систем у реалістичних умовах неоднорідності соціальних контактів.

**4.2. Основні завдання Проєкту** (до 400 знаків):

- Комп'ютерне моделювання та аналітичне дослідження поширення інфекції у просторово однорідній і неоднорідній популяціях.
- Дослідження моделей поширення на складних мережах соціальних, в т.ч. неоднорідних, контактів між агентами.
- Прогнозування епідемії на основі реальних статистичних даних заселеності, мобільності та захворюваності.
- Аналіз соціального відгуку на процес поширення хвороби.

**4.3. Детальний зміст Проєкту:**

- *Сучасний стан проблеми* (до 400 знаків):

Пандемія COVID-19 поєднує загальні аспекти поширення недуг: наявність інкубаційного періоду, вплив мобільності та неоднорідності соціальних контактів та ін. із специфічними: наявність безсимптомних хворих, відсутність вакцини, супутня до епідемії інфодемія. Це вимагає адаптації та застосування всіх цих аспектів.

- *Новизна Проєкту* (до 400 знаків)

Вперше поєднано класичні епідеміологічні підходи (компартментні моделі, коміркові автомати тощо) із методами статистичної фізики складних систем (теорія мереж та ін.). Це дає можливість синергізувати досвід учасників для опису поширення пандемії COVID-19 у реалістичних умовах структурованого соціуму із неоднорідною мережею контактів та поєднати його із процесом поширення супутньої інформації.

- *Методологія дослідження* (до 400 знаків):

методи диференціальних рівнянь, реакційно-дифузійні рівняння; комп'ютерне моделювання методами коміркового автомата для граткових просторових систем, гетерогенних мереж та гібридних систем, популяційної динаміки; підходи статистичної фізики; теорія складних мереж, статистичний аналіз даних.

## **5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проекту, зокрема:**

### **5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проекту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)**

- Запропонована модифікація компартментної моделі SEIRS-1, яка описує поширення COVID-19 в границі повної відсутності імунітету (новий або швидко мутуючий вірус). Отриманий вираз для базового репродуктивного числа як функції коефіцієнтів інфікування, тестування та ізоляції індивідів. Із використанням чисельного розв'язку моделі проаналізована ефективність алгоритму посилення-послаблення карантину за різних умов охоплення популяції тестуванням.
- Розроблена модифікація компартментної моделі SEIRS-2, яка описує поширення COVID-19 з урахуванням наявного тимчасового імунітету індивідів, отриманого або природним шляхом, або завдяки вакцинації. Отриманий вираз для базового репродуктивного числа як функції коефіцієнтів інфікування, тестування та вакцинації. Використовуючи чисельний розв'язок моделі проаналізована залежність часу появи та висоти максимуму першої епідеміологічної хвилі від параметрів моделі та отримані наближені алгебраїчні вирази для передбачення максимуму першої хвилі. Ця ж модель реалізована із заданням просторового розташування індивідів на гратці із змінним числом сусідів з метою явного архування ступеня накладених карантинних обмежень. Досліджений вплив різних режимів накладання карантинних обмежень (слабких і суворих) у комбінації із сценаріями вакцинації населення (повільна чи швидка) з метою пошуку збалансованих рішень.
- Проаналізовано процеси **поширення інфекції на безмасштабних мережах** (що репрезентують неоднорідно розподілені соціальні контакти між індивідами), де розподіл вузлів  $k$  підлягає степеневому розподілу із параметром  $\lambda$ . Враховано гетерогенність мережі у контексті різної сприйнятливості агентів до захворювання (існує частка індивідів  $l-p$ , що мають імунітет внаслідок попередньо проведеної **вакцинації**). Припускається, що тільки частка  $p$  вузлів є активними та сприйнятливими для поширення. Досліджено стаціонарні стани і просторові розподіли сприйнятливих вузлів в рамках моделей SI, SIS і SIR в діапазоні  $2 < \lambda < 3$ , як функції від фракції активних агентів  $p$  і параметру  $\lambda$ .
- У задачі поширення на безмасштабних мережах розглядаються два випадки, при яких вибір частки несприйнятливих вузлів  $l-p$  реалізується в рамках двох **різних сценаріїв вакцинації**: випадковий та спрямований (цільовий). Кількісно підтверджено **ефективність цільового сценарію** та показано, що неоднорідність мережі внаслідок проведеної вакцинації призводить до зростання критичного значення ефективного параметра поширення, а отже сповільнення і утруднення процесу поширення інфекцій в таких системах. Отримано значення критичних ефективних параметрів поширення для обох сценаріїв як функції  $p$  в діапазоні  $2 < \lambda < 3$ .
- Запропоноване **узагальнення моделі Ізінга з різною довжиною спіна**, яка може інтерпретуватись як рівень інфективності конкретного індивіда. В цій частині дослідження здійснено аналіз процесів колективної поведінки на безмасштабній мережі та аналіз фазової діаграми, що демонструє вклади як загальної взаємодії між вузлами (контактності індивідів), так і сили індивідуального спіну (інфективності).
- Досліджено критичну поведінку моделі Ізінга **на мережі з урахуванням кореляцій між вузлами** за ступенями. Отримано вирази для статистичної суми та вільної енергії.
- Проведено аналіз **просторових та часових характеристик переміщення населення** у місті Львові на основі узагальнених даних мобільного оператора. Розвинуто **метапопуляційну компартментну модель** для випадку поширення на мережі соціальних контактів між різними групами населення із прив'язкою до міських зон постійного проживання їх мешканців. Формалізація контактів здійснюється на основі даних про мобільність населення. Теоретичний опис моделі забезпечується відповідною **системою диференціальних рівнянь**, з чисельного розв'язку яких було **отримано просторово-часові розподіли поширення інфекції**. Розглянуто декілька простих штучних моделей, для яких прослідковано різні ефекти **неоднорідного розподілу та мобільності** як окремо, так і в комплексі.

- Використовуючи мета-популяційну модель поширення інфекції розраховано динаміку такого поширення на мережах із прив'язкою до просторового розподілу в різних масштабах. Розглянуто декілька модельних мереж, в тому числі на основі реальних даних розподілу населення та мобільності його в м. Львові. Проаналізовано просторові та часові кореляції між різними вузлами мережі. Показано, як кількість та мобільність населення на одному вузлі мережі (районі міста) впливає на захворюваність на іншому.
- Проаналізовано можливості ресурсу Crossref як потенційного джерела метаданих про українську наукову періодику, необхідного для **аналізу реакції наукової спільноти на пандемію**. Повний цикл кількісного аналізу, починаючи із експорту даних у різних форматах, а завершуючи візуалізацією результатів, було здійснено для близько 24 тисяч бібліометричних записів про статті в українських економічних журналах: проаналізовано динаміку щорічної активності; середню кількість авторів на одну роботу; частку статей, написаних у співпраці; спектр країн, що фігурували у полях афіліації авторів статей; динаміку отриманих цитувань DOI-to-DOI. **Розроблено покроковий алгоритм імпортування та опрацювання даних** про наукові публікації із бази Crossref, а також ідентифікації (уніфікації) авторів.
- Здійснено **дослідження розвитку наукових тематик у препрінтах** ресурсу ArXiv.org. Формалізація структури взаємозв'язків між ними у вигляді складної мережі концепцій дала змогу виявити низку особливостей. А подальша побудова моделі еволюції цієї структури дала краще розуміння того, як відбувається розвиток наукової тематики.
- Здійснено огляд джерел наукових метаданих, які б дали змогу охарактеризувати особливості публікаційної активності українських вчених, що є індикатором **реакції наукової спільноти на глобальні виклики**: гендерні ефекти та впорядкування авторів. В результаті опрацювання та аналізу метаданих, що описують наукові публікації в українських економічних виданнях, було запропоновано спосіб збільшення статистики “гендеризованих” авторських записів саме для вибірки українських вчених; кількісно аргументовано типові риси українських економічних публікацій: переважаюча кількість авторів жінок та гендерна гомофілія для більшості публікацій, типова невпорядкованість прізвищ співавторів за абеткою.
- Запропоновано модель зростання мережі шляхом переважного приєднання блоків взаємопов'язаних вузлів для опису **процесу збагачення словника наукових концепцій**, що характеризує набір наукових публікацій. Показано переваги цієї моделі над рядом інших, що класично використовуються для дослідження еволюції складних мереж.

## 5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтuvання її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Протягом звітного періоду продовжувалась робота над тим, щоб краще зрозуміти та описати процеси, які пов'язані із пандемією COVID-19: поширення інфекцій серед населення та роль різних чинників, які уповільнюють або прискорюють протікання процесу; вплив штучно введених факторів таких, як карантинні обмеження та вакцинація; паралельний розвиток інфодемії - збурення в інформаційному вимірі, що може бути вираженим у потоці новин у ЗМІ, в активності користувачів соцмереж або ж у вигляді зміни наукових тематик досліджень в різних ділянках, що сигналізує про реакцію наукової спільноти, яка, в свою чергу, може генерувати повідомлення, які можуть стати тригерами для зміни підходів до подолання епідемії. З огляду на те, які різні об'єкти досліджувалися в рамках проекту, очікуваною є різноманітність методів та підходів. В рамках робочої групи застосовувалися як аналітичні методи, так і комп'ютерні симуляції, було здійснено спроби врахувати якомога більше реальних даних, що стосуються конкретно України та її окремих регіонів. Наскільки нам відомо, в Україні не проводяться такі комплексні дослідження, натомість наше таргетоване саме на вітчизняні реалії попри те, що отримані результати також мають фундаментальне значення. Адже, незважаючи на те, що виокремлення підсистеми для дослідження властивостей більшої системи, є звичним, складні системи демонструють колективні ефекти, емерджентність та чутливість до змін малих параметрів, а тому потребують саме комплексного підходу.

**5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проекту для економіки та суспільства (стосується проектів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

Як задачі, що стосуються вивчення безпосередньо поширення хвороби, так і задачі вивчення інформаційних процесів, які ставилися у рамках даного проекту, від самого початку були націлені на врахування особливостей саме України: поточних карантинних заходів, реалій звичного для українців способу переміщення у населених пунктах, типових рис публікаційної активності саме вітчизняних вчених, тощо. Саме тому, попри фундаментальну складову, отримані результати мають практичну цінність саме для України. Отримані результати можуть бути застосовані для оцінки збалансованості рівня різних за природою антиепідеміологічних заходів, таких як: карантинні обмеження, охоплення популяції тестуванням, вакцинація.

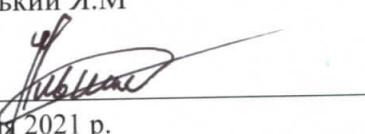
**5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проекту в суспільній практиці.**

Було використані різні канали поширення та оприлюднення результатів, отриманих в рамках цього проекту: регулярно проводилися спеціалізовані безкоштовні та відкриті для широкої аудиторії вебінари, було здійснено ряд доповідей на авторитетних міжнародних та всеукраїнських конференціях. За результатами досліджень було опубліковано 7 статей у рецензованих наукових журналах із добрими рейтингами, а також оприлюднено 7 препринтів, відкритих для загального доступу згідно з політикою відкритої науки.

**Науковий керівник Проекту**

prov. наук. сп., др. фіз.-мат. наук,

Ільницький Я.М

  
8 грудня 2021 р.

*Анотований зміст не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування*