

¹Невінський Д.В., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-0962-072X,
e-mail: nevinskiy90@gmail.com,

²Сем'янів І.О., к.мед.н.,
orcid.org/0000-0003-0340-0766,
e-mail: igor_semianiv@bsmu.edu.ua,

¹Виклюк Я.І., д.т.н.,
orcid.org/0000-0003-4766-4659,
e-mail: vyklyuk@ukr.net,

¹Якимів А.П.,
orcid.org/0009-0007-2758-0614,
e-mail: yakimowa1905@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АГЕНТИ У БОРОТЬБІ З ГЛОБАЛЬНИМИ ЗАГРОЗАМИ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Буковинський державний медичний університет

Вступ

У сучасному світі глобальні загрози, такі як пандемії, екологічні катастрофи та біологічні небезпеки, потребують нових методів їхнього виявлення та подолання. Важливу роль у цій боротьбі відіграють інтелектуальні агенти – автоматизовані системи, здатні аналізувати великі обсяги інформації, ухвалювати рішення та взаємодіяти з людьми для ефективного вирішення складних завдань.

Особливо значущим є застосування інтелектуальних агентів у сфері охорони здоров'я, зокрема для виявлення та лікування туберкульозу (ТБ) – одного з найнебезпечніших інфекційних захворювань. Завдяки інтелектуальним агентам можна оптимізувати медичні процеси, підвищити точність діагностики та полегшити контроль над поширенням хвороб.

Інтелектуальні агенти використовуються для:

- Моніторингу епідемій – аналізу медичних записів, супутникових знімків та повідомлень у ЗМІ для прогнозування можливих спалахів захворювань.
- Розробки вакцин – моделювання структур патогенів та пошуку оптимальних вакцин із використанням складних алгоритмів.
- Автоматизації діагностики – створення систем, які обробляють

лабораторні аналізи та медичні зображення, забезпечуючи швидке та точне виявлення захворювань.

Туберкульоз залишається значною загрозою для здоров'я у всьому світі, особливо в регіонах із недостатньо розвинутою медичною інфраструктурою. Інтелектуальні агенти сприяють боротьбі з цією хворобою в кількох ключових напрямках:

Рання діагностика та скринінг:

- Автоматизовані системи обробки зображень аналізують рентгенівські знімки, виявляючи патологічні зміни в легенях із високою точністю.

- Інтелектуальні помічники підтримують лікарів, надаючи попередні висновки на основі великої бази клінічних даних.

Прогнозування ефективності лікування:

- Агентні системи аналізують історію хвороби пацієнтів та результати попередніх терапій, прогнозуючи ймовірність рецидиву або розвитку стійких до ліків форм ТБ.

- Персоналізовані рекомендації щодо лікування допомагають лікарям обирати найефективніші терапевтичні схеми для кожного пацієнта.

Розробка нових лікарських засобів:

- Автоматизовані моделі знаходять нові антибіотики, ефективні проти стійких штамів туберкульозу.

- Віртуальні симуляції дозволяють швидко перевіряти потенційний вплив нових молекул перед клінічними дослідженнями.

Контроль поширення захворювання:

- Аналітичні агенти обробляють великі масиви даних для прогнозування нових спалахів та розробки ефективних стратегій їхнього стримування.

- Інтерактивні мобільні додатки та чат-боти нагадують пацієнтам про необхідність прийому ліків, забезпечують дистанційний моніторинг стану здоров'я та збирають статистику про поширення ТБ.

Завдяки інтелектуальним агентам медицина стає більш точною, оперативною та ефективною, що значно покращує боротьбу з небезпечними захворюваннями та сприяє загальному зміцненню системи охорони здоров'я.

Туберкульоз (ТБ) продовжує залишатися глобальною проблемою людства. Питання протидії ТБ в Україні є одним з пріоритетних напрямів державної політики у сфері охорони здоров'я і соціального розвитку та предметом міжнародних зобов'язань. Це інфекційне захворювання, спричинене бактерією *Mycobacterium tuberculosis*, щороку вражає мільйони людей у всьому світі. У глобальному масштабі, невилікуваний ТБ становить серйозну загрозу здоров'ю решти населення, оскільки ця хвороба передається крапельним шляхом, тобто одна особа з ТБ може упродовж року інфікувати 10 і більше осіб, якщо вона не буде лікуватися і вживати застережних заходів з інфекційного контролю. Незважаючи на значні досягнення у сфері діагностики, лікування та профілактики, туберкульоз залишається серйозною загрозою, особливо в країнах з низьким і середнім рівнем доходу. У сучасних умовах особливу увагу привертає проблема швидкого поширення туберкульозу у великих містах, де висока щільність населення сприяє активній передачі інфекції.

Крім того, ситуація ускладнюється появою стійких до ліків форм туберкульозу, що ускладнює процес лікування та підвищує рівень смертності. У цьому контексті ефективне моделювання процесів поширення захворювання є важливим інструментом для розробки стратегій боротьби з епідемією.

За даними Центру громадського здоров'я, у 2023 році в нашій країні зареєстрували 19 851 випадок активного туберкульозу, з яких 639 – серед дітей до 14 років, 196 – серед підлітків віком 15-17 років. Тобто це 48,4 на 100 000 населення, що на 7,3% більше аналогічного показника 2022 року (18 510, або 45,1 на 100 000 населення). Значна частина населення має латентну форму інфекції, близько 20-30% українців [1]. У країнах Європи ситуація значно краща – кількість латентних серед населення становить приблизно 12%. Ці показники вказують на ефективнішу профілактику та кращий доступ до лікування. З початком повномасштабної війни росії проти України, тисячі людей мігрували у інші країни(здебільшого, у Європу). Це створює додаткові ризики для поширення інфекції, оскільки Україна – країна із високим рівнем латентної інфекції. [2]

Метою роботи є дослідження поширення туберкульозу у містах України та Європи з використанням інтелектуальних агентів на основі клітинних автоматів. У роботі буде розглянуто як загальні закономірності епідеміологічного процесу, так і особливості, притаманні різним географічним та соціально-економічним умовам. Основні акценти зроблено на аналізі динаміки поширення інфекції та оцінці ризиків.

Матеріали та методи

Аналіз предметної області

Туберкульоз, як і інші інфекційні захворювання, потребує ефективного реагування з боку урядів і систем охорони здоров'я. Протягом останніх років численні дослідження зосередилися на моделюванні поширення цієї хвороби, використовуючи методи, такі як інтелектуальні агенти на основі клітинних автоматів. Ці підходи дозволяють аналізувати динаміку

захворюваності, моделюючи взаємодію інфікованих та здорових осіб у певному середовищі. Вони допомагають оцінити ефективність програм скринінгу та лікування, а також дослідити вплив соціальних та екологічних чинників на поширення туберкульозу. Розглянемо дослідження у цій галузі:

У роботі *“Prospects for the use of artificial intelligence to predict the spread of tuberculosis infection in the WHO European Region”* [2] проаналізовано перспективи використання штучного інтелекту та нейромереж для прогнозування поширення туберкульозу в Європейському регіоні ВООЗ. Вона підкреслює зв'язок між міграцією, особливо внаслідок війни в Україні, та зростанням ризиків розповсюдження інфекції. Автори пропонують створення геопросторових математичних моделей на основі великих даних для ефективного моніторингу та контролю захворюваності.

У роботі *“Застосування геопросторової мультиагентної системи для моделювання різних аспектів передачі туберкульозу”* [3] виконано моделювання поширення туберкульозу (ТБ) за допомогою геопросторової мультиагентної системи. Вона описує алгоритм, що використовує нейронні мережі для створення моделі передачі ТБ у міському середовищі. Модель враховує різні фактори, такі як міжособистісні контакти, місце проживання, транспорт та робоче середовище.

У дослідженні *“Вивчення зв'язку між туберкульозом та соціально-економічними, медичними, демографічними чинниками в Україні”* [6] аналізується зв'язок між соціально-економічними, медичними та демографічними факторами і рівнем захворюваності на туберкульоз в Україні. Використовуючи методи штучного інтелекту та машинного навчання, визначено ключові чинники, що впливають на поширення хвороби, серед яких найважливішими є бактеріовиділення та флюорографічні огляди населення.

У роботі *“Applying geospatial multi-agent system to model various aspects of tuberculosis transmission”* [9]

представлений опис використання геопросторової багатоагентної системи для моделювання поширення туберкульозу. Дослідження включає розробку алгоритму, який за допомогою штучного інтелекту створює модель міста та аналізує шляхи передачі інфекції. Модель дозволяє відстежувати поведінку кожного агента, оцінювати динаміку захворювання та розробляти стратегії профілактики. Результати показали стабільність моделі та її відповідність медичним даним.

Аналіз представлених досліджень щодо туберкульозу демонструє різноманітні підходи до моделювання його поширення та впливу на суспільство, акцентуючи увагу на необхідності вибору оптимальних стратегій вакцинації та генеалогічного моделювання для ефективного контролю захворювання. Водночас виявлено суттєві недоліки, зокрема обмежене порівняння результатів і відсутність детального аналізу параметрів моделей.

Для підвищення ефективності боротьби з туберкульозом необхідний більш глибокий аналіз та валідація моделей, що враховують реальні дані та специфіку регіонів. Виведення моделі на макрорівень для міст України та Європи дасть змогу адаптувати підходи до особливостей урбаністичного середовища, щільності населення та соціальних факторів. Інтеграція різних методів моделювання та глибше розуміння соціальних динамік сприятимуть розробці ефективних стратегій боротьби з туберкульозом у контексті глобальних епідеміологічних викликів.

З урахуванням зазначених джерел, створення власної моделі інтелектуальних грантів на основі статичних клітинних автоматів із валідацією дозволяє здійснювати прогнозування на макрорівні. Це забезпечує точне передбачення поширення інфекцій з урахуванням регіональних особливостей, щільності населення та соціальних умов. Такий підхід сприяє розробці ефективних стратегій реагування, оптимізації вакцинальних кампаній і покращенню управління ресурсами системи охорони здоров'я.

Використані методи

У даному дослідженні використовуються інтелектуальні агенти на базі статичних клітинних автоматів. Основна їхня особливість полягає в тому, що структура решітки залишається незмінною протягом усього процесу моделювання, а правила оновлення станів визначаються заздалегідь. Це дозволяє моделювати широкий спектр систем, таких як динаміка поширення епідемій, поведінка екологічних систем, транспортні потоки тощо. Для логіки переходу станів агентів було взято формули із роботи [3] про застосування геопросторової мультиагентної системи.

Математична модель

На рис. 1 представлена математична модель перебігу туберкульозу на основі даних Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ). Модель ілюструє можливі стани інфікованої людини, ймовірність розвитку захворювання, перехід між станами та можливі наслідки. Вона допомагає зрозуміти основні етапи поширення хвороби та можливі сценарії розвитку, що є важливим для ефективного контролю та лікування інфекції. Хоч людству вже давно відома схема передачі та перебігу хвороби, урядам та організаціям так і не вдається взяти під контроль це захворювання.

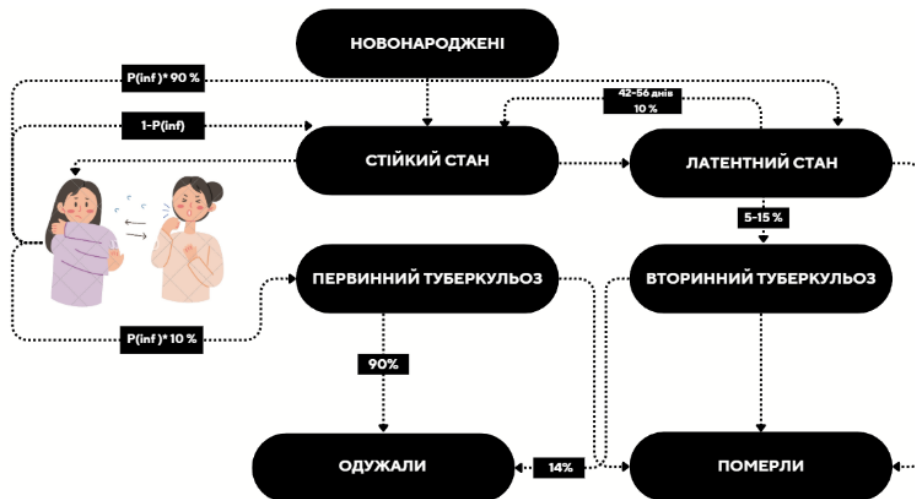


Рис. 1. Модель перебігу туберкульозу у разі інфікування людини за даними ВООЗ

Як відомо, у клітинних автоматах присутня одиниця — інтелектуальний агент, яка може переходити зі стану в стан за допомогою певних інтелектуальних правил.

Отже, агент може перебувати в одному із 4 станів, а саме:

- *SUSCEPTIBLE* (стійкий/здоровий) — неінфіковані, але можуть заразитися.
- *LATENT* (латентні) — інфіковані, але не заражаються та не передають інфекцію іншим.
- *INFECTED* (інфіковані) — ті, які заражають інших, самі можуть перейти у латентний стан або померти.
- *DEAD* (мертві) — не мають взаємодії з іншими.

Перехід відбувається наступним чином:

- При контакті з інфікованою особою, здорова особа може заразитися з ймовірністю $P(inf)$;
- У разі зараження, здоровий інтелектуальний агент може перейти в активний або латентний стан. З ймовірністю 10% ІА переходить в активний стан захворювання туберкульозу, а з ймовірністю 90% — отримує статус латентний;
- Після завершення інфекційного періоду хворі агенти переходять у стан мертвих або ті, що одужали. Ймовірність, що агент помре, становить 10,4%, тоді як ймовірність переходу в стан одуження — 90%.

Для моделювання поширення туберкульозу (ТБ) у рамках моделі необхідно

визначити індивідуальні атрибути здоров'я для кожного агента (нехай множина агентів у автоматі задається як $A = \{a_i\}_{i=1}^N$, де N – загальна кількість агентів) та задати правила їхньої зміни. Для перевірки адекватності моделі будуть враховані лише ключові параметри здоров'я агентів, які впливають на ризик інфікування та перебіг хвороби.

Проаналізуємо атрибути агента a_i :

- st : стан здоров'я агента, що може приймати значення S, L, I, R та D .
- t_st : час перебування агента в стані st .
- con : контагіозність агента, тобто рівень заразності інфікованого агента.
- bel : логічне значення (*true/false*), що визначає, чи втратить інфікований агент, який перебуває в латентному стані, бактерію.
- t_bel : кількість днів, через яку агент втрачає бактерії ТБ.
- pp : логічне значення (*true/false*), що визначає, чи людина, яка перебуває в латентному стані, захворіє на ТБ протягом життя.
- t_pp : кількість днів, через яку людина, котра перебуває в латентному стані, захворіє на ТБ.
- p_death : імовірність смерті агента в разі перенесення ТБ.

Для встановлення ймовірностей переходу були також застосовані формули [3], а саме:

- ймовірність переходу здорової агента в латентний або інфікований стан:

$$\begin{cases} L: x < P_{inf} \text{ and } x_{pi} \geq P_{pi} \\ I: x < P_{inf} \text{ and } x_{pi} < P_{pi}, \\ S: x \geq P_{inf} \end{cases}$$

де $x, x_{pi} \in [0, 1]$ – випадкове число;

- ймовірність переходу інфікованої агента в латентний стан та ймовірність смерті інфікованого агента:

$$\begin{cases} L: x_{pi} \geq P_{pd} \\ D: x_{pi} < P_{pd} \end{cases}$$

де $x_{pi} \in [0, 1]$ – випадкове число;

- формула для статичної ймовірності розповсюдження інфекції:

$$P(i, j) = \beta \cdot \frac{S(i, j)}{N} \cdot \sum (m, n) \in Neighbors(i, j) \cdot I(m, n)$$

де $P(i, j)$ – ймовірність передачі інфекції до агента який розташований в клітині з координатами (i, j) ; β – константа, що визначає базову ймовірність передачі інфекції між сусідніми агентами. Цей параметр залежить від властивостей патогену; $S(i, j)$ – стан агента (i, j) , що вказує на її сприйнятливості до інфекції. Наприклад, $S(i, j) = 1$ для сприйнятливих клітин і $S(i, j) = 0$ для несприйнятливих; N – кількість агентів які розташовані у сусідніх клітинах у визначеній топології; $Neighbors(i, j)$ – сусідні агенти, що розташовані у координатах (i, j) у заданій топології (наприклад, найближчі сусіди); $I(m, n)$: Інфекційний стан сусіднього агента з координатами (m, n) . Наприклад, $I(m, n) = 1$ для інфікованих агентів і $I(m, n) = 0$ для здорових.

Також важливим для моделі є валідація аби отримати коректні результати. Згідно з даними ВООЗ[11], на 100 тисяч населення припадає приблизно 44 хворих. Візьмемо до прикладу Львів із 700 тисяч населенням і обчислимо кількість хворих, яка має вийти у результаті симуляції через 10 років.

Виходить:

$$\frac{44 \text{ хворих}}{x} = \frac{100 \text{ 000}}{700 \text{ 000}}.$$

Розв'язавши пропорцію, отримуємо:

$$x = \frac{44 \cdot 700 \text{ 000}}{100 \text{ 000}} = 308 \text{ хворих}.$$

Тобто, модель має показувати на графіках цифри, близькі до даних обчислень. Шляхом прописування логіки, обчислень ймовірностей та тестуванні моделі при різних параметрах, вдалось валідувати модель для отримання реальних показників. Зі зміною міст, змінюються показники на графіках, при чому близькі до реальних, тож валідація відбулась успішно.

Аналіз результатів

Для демонстрації та порівняння результатів дослідження, у даній роботі обрано місто Львів та Стокгольм. В Україні

симуляцію розпочинається із вже наявними 90% латентним населенням [1], тоді як для міст Європи – з 0% латентних (хоча, ця цифра може дещо коливатись, в різних містах Європи). Початкові умови симуляції для України та Європи дають змогу адаптувати модель до специфічних епідеміологічних реалій кожного регіону, що дозволяє точніше оцінити поширення хвороби. Симуляція проводиться протягом 10 років аби побачити зміни.

Для Львова:

На рисунку 2 представлено динаміку поширення туберкульозу впродовж 10 років у місті Львів. На початку моделювання (0 днів) переважає латентна форма хвороби (позначена жовтим кольором), тоді як активні випадки інфекції (червоний колір) з'являються поступово, досягаючи значної концентрації до кінця періоду.

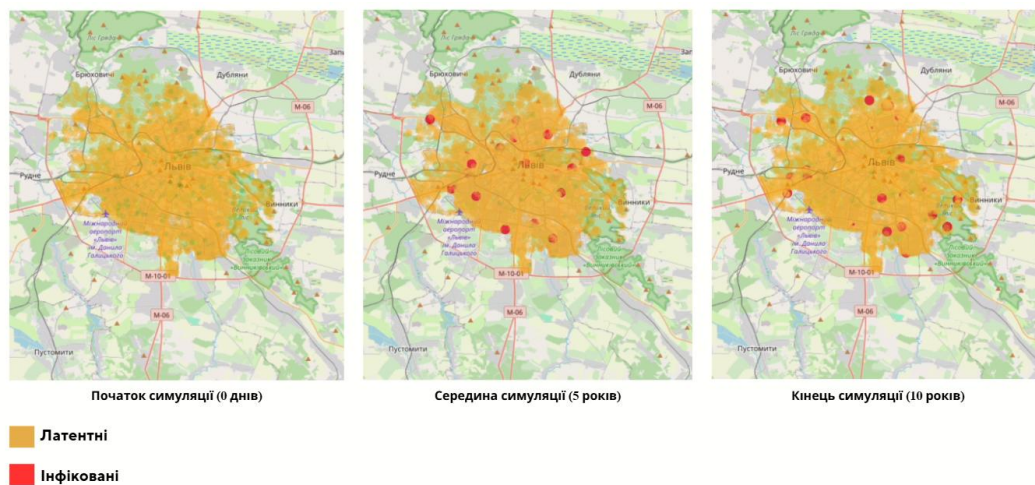


Рис. 2. Динаміка поширення туберкульозу у Львові

На рис. 2 представлено моделювання поширення туберкульозної інфекції протягом 10 років у популяції, яка первинно була інфікована на 90 %. Ми можемо бачити збільшення кількості активних хворих, за рахунок інфікування все більшої кількості людей, а також, відсутності лікування. Дана модель показує поширення туберкульозу в популяції, не враховуючи лікування активних хворих та профілактику туберкульозу в групах ризику.

Таке збільшення кількості активних пацієнтів показує важливість ранньої діагностики, лікування та профілактики туберкульозу. Те, що до сьогодні ми не можемо подолати таке інфекційне захворювання як туберкульоз, ще раз доводить необхідність змінювати підходи, а симуляція передачі туберкульозу повинна допомогти медичній спільноті вирішити цю проблему.

Результати симуляції представлені на рисунку 3 показують, що нові активні пацієнти протягом років доведуть кількість інфікованих майже до 100 %, що не

дозволить ніколи подолати епідемію туберкульозу. Це показує необхідність якнайшвидшого виявлення активних пацієнтів, щоб не було можливості поширення та зараження нових людей.

Також ми бачимо, що кількість активних хворих постійно то збільшується то зменшується, але коливається на високому рівні. Дана модель показує, наскільки важливим є контрольоване лікування активних хворих, оскільки, вони несуть найбільшу загрозу в суспільстві, і окрім того, що самі мають досить високий ризик смертності від туберкульозу, також заражають інших, тих хто ще не був інфікованих, або вилікувався від туберкульозу раніше.

Для Стокгольма:

На рисунку 4 представлено динаміку поширення туберкульозу впродовж 10 років у місті Стокгольм. Початковий етап (0 днів) характеризується здоровим населенням. Згодом, через 5 років, інфекція набуває поширення, і більшість населення переходить у латентний стан (жовтий колір),

тоді як активні випадки (червоний колір) з'являються та локалізуються у певних районах. До кінця моделювання (10 років) інфіковані особи стають більш помітними, що вказує на зростаючу загрозу епідемії.

Результат симуляції в Європейському місті, на прикладі Стокгольму, показав іншу картину, яка є більш загрозливою та повинна бути насторогою для Європейських міст та регіонів, які прийняли велику кількість біженців та переселенців спочатку з Сирії та Близького Сходу, а тепер і з України.

Як видно з отриманих даних, вже через 5 років, кількість інфікованих туберкульозом осіб стрімко збільшиться, а через 10 років, практично всі будуть інфікованими.

Також, як видно з симуляції, з'являється все більше випадків активних пацієнтів, які несуть найбільшу загрозу для систем охорони здоров'я Європейського регіону, оскільки, вони оманливо думають, що туберкульоз у них під контролем.

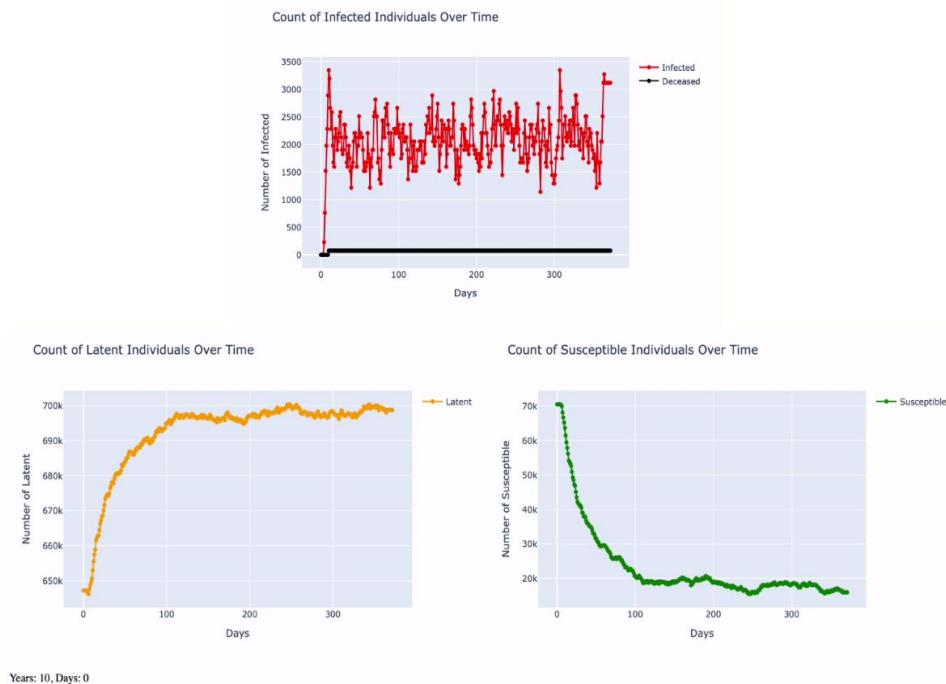


Рис. 3. Графіки результатів через 10 років симуляції для Львова

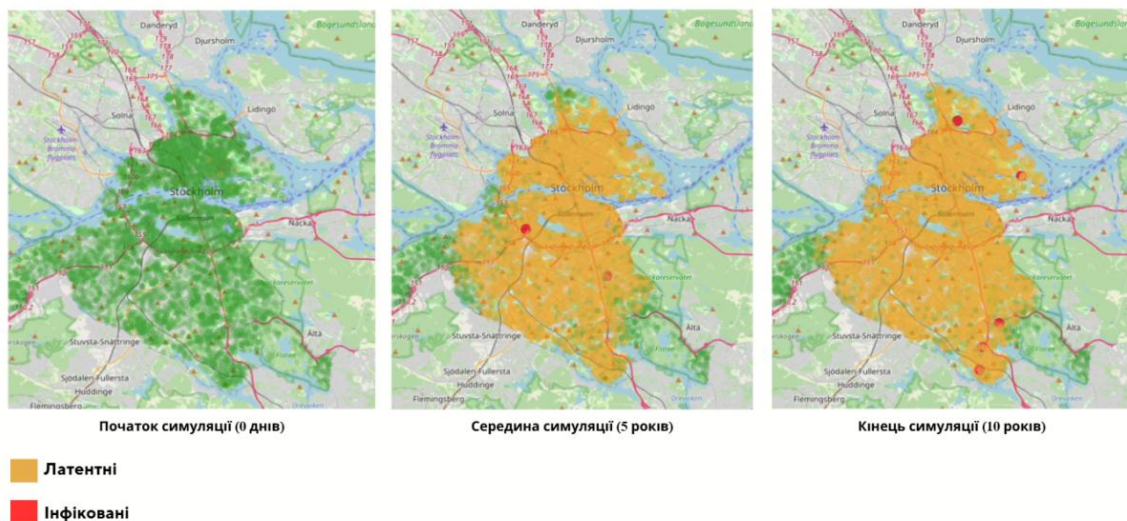


Рис. 4. Динаміка поширення туберкульозу у Стокгольмі

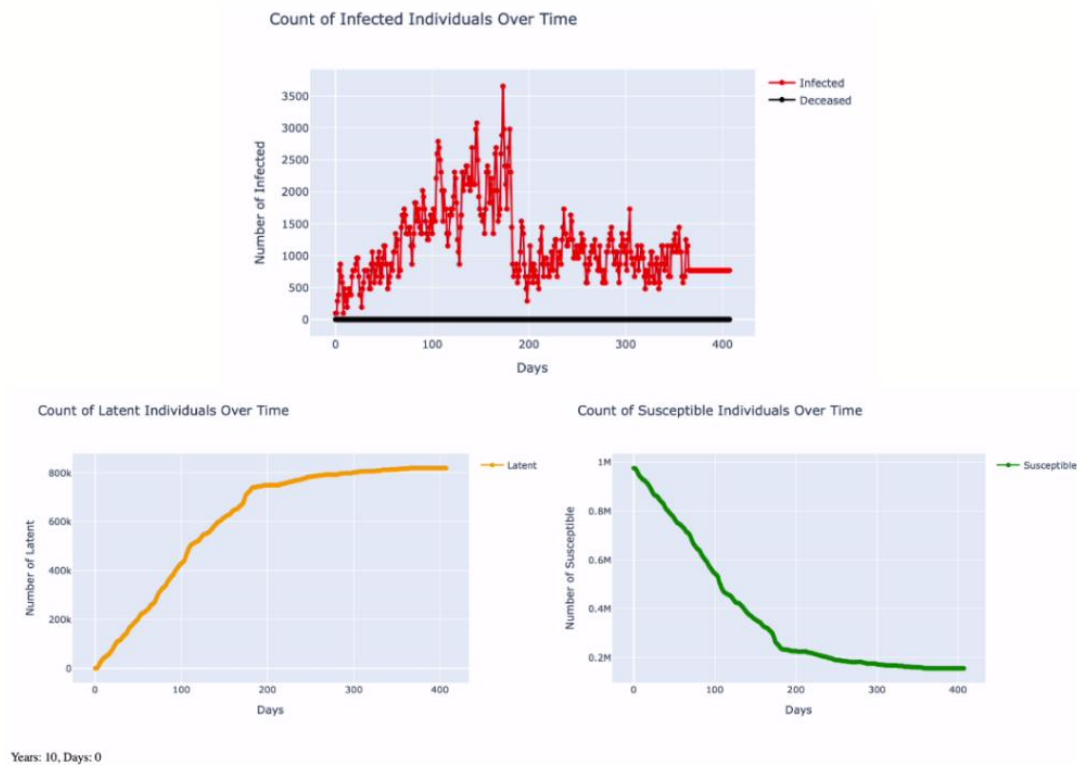


Рис. 5. Графіки результатів через 10 років симуляції для Стокгольма

Як видно з рисунку 5, спостерігається дещо інша картина кількості активних пацієнтів, а саме спостерігається різке зростання чисельності таких пацієнтів, а далі спад. Натомість стабільне збільшення кількості інфікованих осіб доходить до максимуму через 10 років, що неодмінно відбувається у популяції, де спочатку немає інфікованих та хворих, або ж їх одиниці, пізніше ж, приїжджають сотні тисяч мігрантів інфікованих або хворих ана активний туберкульоз, що може призвести до ось таких наслідків, які продемонструвала наша симуляція.

Інтелектуальні агенти відіграють важливу роль у боротьбі з глобальними загрозами, зокрема з туберкульозом. Їхнє застосування дозволяє значно покращити діагностику, лікування та контроль поширення хвороби, що в перспективі сприятиме зниженню рівня смертності та підвищенню якості медичних послуг. Подальший розвиток інтелектуальних агентів у медицині відкриє нові можливості для боротьби з

інфекційними захворюваннями, підвищуючи ефективність охорони здоров'я у всьому світі.

Висновки

Проведене моделювання поширення туберкульозу за допомогою інтелектуальних агентів які базується на теорії статичних клітинних автоматів дозволило оцінити динаміку інфікування у міських популяціях залежно від початкових умов, виявивши суттєві відмінності між регіонами з високою та низькою захворюваністю.

Аналіз результатів симуляції показав, що у містах із високим рівнем латентної інфекції поширення туберкульозу відбувається поступово, тоді як у містах, де початковий рівень інфікування є низьким, епідемія розвивається різко після появи активних носіїв.

Валідація моделі за офіційними даними ВООЗ підтвердила її точність у передбаченні рівня захворюваності, що дозволяє використовувати її для оцінки ризиків та розробки ефективних стратегій боротьби з туберкульозом.

Отримані результати демонструють необхідність раннього виявлення та контролю активних хворих, оскільки відсутність своєчасної діагностики та лікування сприяє неконтрольованому зростанню інфікування та збільшенню смертності.

Розроблена модель може бути використана для прогнозування впливу міграційних процесів на поширення туберкульозу, що є особливо важливим у контексті глобальної мобільності населення та зміни епідеміологічної ситуації у приймаючих країнах.

Література

1. Статистика захворюваності на ТБ в Україні. Центр громадського здоров'я. URL: <https://phc.org.ua/kontrol-zakhvoryuvan/tuberkuloz/statistika-z-tb>.
2. Todoriko L. D. et al. Prospects for the use of artificial intelligence to predict the spread of tuberculosis infection in the WHO European Region. *Туберкульоз легеневі хвороби ВЛІ-інфекція*. 2023. Т. 53, № 2. С. 86–92. DOI: 10.30978/TB2023-2-86.
3. Сем'янів І. О. та ін. Застосування геопросторової мультиагентної системи для моделювання різних аспектів передачі туберкульозу. *Infusion & chemotherapy*. 2024. Т. 7, № 1. С. 9–17. DOI: 10.32902/2663-0338-2024-1-9-17.
4. Mesa documentation. URL: https://mesa.readthedocs.io/latest/apis/api_main.html.
5. Vyklyuk Y., Nevinskyi D., Boyko N. GEOCITY—A new dynamic-spatial model of urban ecosystem. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA*. 2023. Vol. 73, no. 2. P. 187–203. DOI: 10.2298/IJGI2302187V.
6. Невінський Д. В., Сем'янів І. О., Вихлюк Я. І. Вивчення зв'язку між туберкульозом та соціально-економічними, медичними, демографічними чинниками в Україні. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2025. №1. С.19–31.
7. Статистика поширення ТБ у світі. Українська правда. URL: <https://life.pravda.com.ua/health/u-2023-mu-roci-u-sviti-na-tuberkuloz-zahvorili-8-mln-lyudey-ce-nayvishchiy-pokaznik-v-istoriji-304574/>.
8. Ng A. Machine Learning Yearning. 2018. 80 p.
9. Vyklyuk Y. et al. Applying geo-spatial multi-agent system to model various aspects of tuberculosis transmission. *New Microbes and New Infections Journal*. 2024. Vol. 59. DOI: 10.1016/j.nmni.2024.101417.
10. Hrizi O. et al. Tuberculosis disease diagnosis based on an optimized machine learning model. *Journal of Health Engineering*. 2022. DOI: 10.1155/2022/8950243.
11. World Health Organization. Latent tuberculosis infection. Updated and consolidated guidelines for programmatic management. 2018.
12. Brauer F., Castillo-Chavez C., Feng Z. Mathematical models in epidemiology. 2019.
13. Mabud T. S. et al. Evaluating strategies for control of tuberculosis in prisons and prevention of spillover into communities: An observational and modeling study from Brazil. *PubMed*. 2019. Vol. 16, no. 1. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002737.
14. Feshchenko Yu. I. et al. Pathomorphosis of tuberculosis – the realities of the day and chemioresistance as a sign of its progression. 2018.
15. Butov D., Feshchenko Y., Chesov D. National survey on the impact of the war in Ukraine on TB diagnostics and treatment services in 2022. *The international journal of tuberculosis and lung disease : the official journal of the International Union against Tuberculosis and Lung Disease*. 2023. Vol. 27, no. 1. P. 86–88. DOI: 10.5588/ijtld.22.0563.

Невінський Д.В., Сем'янів І.О., Виклюк Я.І., Якимів А.П.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АГЕНТИ У БОРОТЬБІ З ГЛОБАЛЬНИМИ ЗАГРОЗАМИ

У статті досліджено застосування інтелектуальних агентів для боротьби з туберкульозом, який залишається значною загрозою суспільному здоров'ю. Запропоновано модель поширення захворювання на основі клітинних автоматів, що дозволяє аналізувати динаміку інфікування з урахуванням соціально-економічних та демографічних особливостей. Проведено симуляції для Львова та Стокгольма, які показали суттєві відмінності у швидкості поширення інфекції залежно від початкового рівня латентного зараження.

Для Львова прогнозована кількість активних хворих через 10 років досягає 308 осіб на 100 тисяч населення, що вказує на необхідність ефективного контролю. У Стокгольмі, де початковий рівень інфікованих значно нижчий, спостерігається поступове поширення хвороби, зумовлене міграційними процесами. Валідація моделі за офіційними даними ВООЗ підтвердила її точність, що дозволяє використовувати її для прогнозування епідемій та розробки стратегій боротьби із захворюванням.

Отримані результати підкреслюють важливість ранньої діагностики, моніторингу активних хворих і врахування міграційних процесів у формуванні профілактичних заходів. Використання інтелектуальних агентів може значно покращити управління епідеміями та підвищити ефективність медичних стратегій.

Ключові слова: інтелектуальні агенти; туберкульоз; клітинні автомати; епідеміологічне моделювання; поширення інфекцій; міграція; охорона здоров'я.

Nevinskyi D.V., Semianiv I.O., Vyklyuk Y.I., Yakymiv A.P.

INTELLIGENT AGENTS IN THE FIGHT AGAINST GLOBAL THREATS

This paper explores the application of intelligent agents in combating tuberculosis, which remains a significant public health threat. A cellular automata-based disease spread model is proposed, enabling the analysis of infection dynamics while considering socio-economic and demographic factors. Simulations conducted for Lviv and Stockholm reveal significant differences in the speed of disease transmission depending on the initial level of latent infection.

In Lviv, the projected number of active tuberculosis cases reaches 308 per 100,000 people within ten years, highlighting the need for effective control measures. In Stockholm, where the initial infection rate is much lower, the disease spreads gradually, driven by migration processes. Model validation using official WHO data confirmed its accuracy, allowing it to be used for epidemic forecasting and the development of disease control strategies.

The results emphasize the importance of early diagnosis, active case monitoring, and the consideration of migration processes in shaping preventive measures. The use of intelligent agents can significantly improve epidemic management and enhance the effectiveness of public health strategies.

Keywords: intelligent agents; tuberculosis; cellular automata; epidemiological modeling; disease spread; migration; public health.