

УДК: 004.02, 004.67, 004.891.3, 616.24

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.017094

Невінський Д. В., к.т.н.; Сем'янів І.О., к.мед.н.;
Виклюк Я.І., д.т.н.

РУХОМІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АГЕНТИ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТУБЕРКУЛЬОЗУ В МАЛИХ МАСШТАБАХ

Nevinskyi D. V., Semianiv I.O., Vykylyuk Ya.I. Mobile intelligent agents for predicting the spread of tuberculosis on a small scale. The article presents a study focused on the development and analysis of a tuberculosis spread model in enclosed spaces using moving cellular automata based on principles of information technology and artificial intelligence. The proposed approach accounts for the mobility of infected agents, spatial characteristics of the environment, ventilation conditions, and the stochastic nature of *Mycobacterium tuberculosis* transmission. The model incorporates four cell states (healthy, latent, active, dead) with probabilistic transition rules reflecting real epidemiological processes. Numerical experiments were conducted across three environments—open area, office space, and trench—simulating diverse agent interaction conditions. Results revealed that spatial geometry significantly impacts disease dynamics: in enclosed spaces, the peak proportion of active cases reaches 6%, compared to 2.3% in open areas. The active phase duration varies from 400 days in trenches to 650 days in offices, with the latent case proportion in enclosed settings peaking at 42.6%. Model validation confirmed its alignment with real data, where one infected individual infects 10–15 others. The findings highlight the model's potential for predicting tuberculosis outbreaks in Ukraine and designing preventive measures, such as ventilation optimization or quarantine strategies.

Keywords: tuberculosis, moving cellular automata, artificial intelligence, intelligent agents, information technology, modeling

Невінський Д.В., Сем'янів І.О., Виклюк Я.І. Рухомі інтелектуальні агенти для прогнозування поширення туберкульозу в малих масштабах. У статті розроблено модель поширення туберкульозу в закритих приміщеннях з використанням рухомих клітинних автоматів. Модель враховує мобільність агентів, просторові особливості та стохастичність передачі інфекції. Проведено експерименти в різних середовищах (відкрита місцевість, офіс, окоп), що показали залежність динаміки захворювання від геометрії простору. Результати підтверджують ефективність моделі для прогнозування та профілактики туберкульозу в Україні.

Ключові слова: туберкульоз, рухомі клітинні автомати, штучний інтелект, інтелектуальні агенти, інформаційні технології, моделювання

Вступ

Туберкульоз (ТБ) залишається однією з найнебезпечніших інфекційних хвороб у світі, особливо в закритих приміщеннях, де повітряно-крапельний механізм передачі сприяє швидкому поширенню збудника *Mycobacterium tuberculosis*. Традиційні епідеміологічні моделі не завжди можуть точно врахувати складні процеси взаємодії між інфікованими та здоровими людьми, вентиляційні особливості приміщень та стохастичний характер поширення частинок, що містять бактерії.

Ситуація з туберкульозом в Україні викликає особливе занепокоєння. Країна входить до переліку держав із високим рівнем захворюваності на ТБ. За даними ДУ «Центр громадського здоров'я Міністерства охорони здоров'я України» у 2024 році кількість уперше зареєстрованих в Україні захворювань на ТБ, включно з його рецидивами, становила 18 140, або 44,2 на 100 000 населення [1]. Підраховано, що близько 30% населення земної кулі має латентну форму туберкульозу – у Європейському регіоні цей показник складає близько 14%, у Південно-Східній Азії – до 46%. Точних даних про поширення латентного туберкульозу в Україні не існує, хоча прийнято вважати, що близько 90% українців інфіковані туберкульозом [2].

У людей із наявністю латентної туберкульозної інфекції упродовж життя існує 5% -10% ризик розвитку захворювання на туберкульоз. Однак, цей ризик є значно вищим у осіб із ослабленою імунною системою, наприклад, у людей, які живуть з ВІЛ. Війна, що триває в Україні, лише загострює проблему, адже бойові дії змушують людей перебувати в окопах,

бомбосховищах та інших закритих просторах із поганою вентиляцією. Це створює ідеальні умови для поширення інфекції серед військових та цивільного населення [2].

Одним із перспективних підходів до моделювання таких процесів є використання рухомих клітинних автоматів (Moving Cellular Automata, MCA). На відміну від класичних клітинних автоматів, де кожна клітина статична, рухомі клітинні автомати дозволяють моделювати поведінку частинок або агентів у динамічному середовищі. Це дає змогу детальніше дослідити механізми передачі туберкульозу в приміщеннях, оцінити вплив соціальної поведінки людей, а також розробити ефективні стратегії зменшення ризику зараження.

Аналіз останніх досліджень. Туберкульоз, як і інші інфекційні захворювання, потребує швидкого й ефективного реагування з боку урядів та систем охорони здоров'я. Упродовж останніх років значна кількість досліджень була зосереджена на моделюванні поширення цієї хвороби за допомогою таких методів, як клітинні автомати та їхні різновиди, зокрема рухомі клітинні автомати.

Класичні клітинні автомати дозволяють відтворювати динаміку захворювання шляхом моделювання взаємодії між інфікованими та здоровими людьми в певному середовищі. У свою чергу, рухомі клітинні автомати забезпечують більшу точність моделювання завдяки можливості враховувати мобільність людей та зміни їхнього просторового розташування, що краще відповідає реальним умовам поширення хвороби.

Завдяки таким підходам можна оцінювати ефективність програм скринінгу й лікування, прогнозувати спалахи інфекції та аналізувати вплив соціальних і екологічних факторів на поширення туберкульозу. Далі розглянемо дослідження, присвячені цій темі:

У роботі «Застосування геопросторової мультиагентної системи для моделювання різних аспектів передачі туберкульозу» [3] було змодельовано процес поширення туберкульозу (ТБ) із використанням геопросторової мультиагентної методики. У роботі наведено алгоритм, що базується на нейронних мережах для створення моделі передачі ТБ у міському середовищі. Модель враховує низку чинників, зокрема соціальні контакти, місце проживання, транспортні маршрути та робочі умови.

У дослідженні «Applying geospatial multi-agent system to model various aspects of tuberculosis transmission» [5] описано використання геопросторової багатоагентної системи для моделювання поширення туберкульозу. У роботі розроблено алгоритм, що застосовує штучний інтелект для створення міської моделі та аналізу шляхів передачі інфекції. Завдяки цій моделі можна відстежувати дії кожного агента, оцінювати динаміку поширення хвороби та планувати профілактичні заходи. Отримані результати підтвердили стабільність моделі та її відповідність реальним медичним даним.

У дослідженні «Prospects for the use of artificial intelligence to predict the spread of tuberculosis infection in the WHO European Region» [9] розглянуто можливості застосування штучного інтелекту та нейронних мереж для прогнозування поширення туберкульозу в країнах Європейського регіону ВООЗ. У роботі акцентовано увагу на зв'язку між міграційними процесами, зокрема через війну в Україні, та підвищенням ризиків поширення інфекції. Автори рекомендують розробку геопросторових математичних моделей на основі аналізу великих даних для ефективного моніторингу та контролю рівня захворюваності.

Метою роботи є розробка та аналіз моделі поширення туберкульозу в закритих приміщеннях із використанням рухомих клітинних автоматів. Такий підхід дає змогу більш точно врахувати особливості просторової динаміки інфекції, вплив вентиляції, густоту населення та інші ключові фактори, що впливають на ризик зараження. У роботі буде розглянуто ефективність цього методу порівняно з традиційними моделями та його можливе застосування для прогнозування та профілактики туберкульозу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Математична модель. У даній моделі клітинний автомат використовується для моделювання поширення туберкульозу в середовищі, де агенти (клітини) мають здатність до переміщення. Всі клітини можуть перебувати в одному з чотирьох станів: Healthy (здоровий),

Latent (латентний), Active (активний) або Dead (мертвий). Переходи між цими станами визначаються як детермінованими, так і ймовірнісними правилами.

Рух клітин у середовищі. На відміну від статичних клітинних автоматів, рухомий клітинний автомат дозволяє клітинам змінювати своє місцеперебування. Це важливо для моделювання ситуацій, коли люди (агенти) пересуваються в різних локаціях. Правила руху клітин залежать від типу середовища:

- Рух клітин обмежений полігоном, котрий відтворює простір різних локацій. У відкритій місцевості клітини можуть переміщуватися вільніше, та щільність їхнього розташування нижча.

- Клітини відбиваються від стін із додаванням випадкової складової до кута відбивання, щоб уникнути повторення траєкторії руху.

- Швидкість руху клітин також є рандомізованою, щоб уникнути синхронізації та сприяти більш природному поширенню процесу.

Стани клітин та переходи між ними. Кожна клітина може перебувати в одному з чотирьох станів:

1. Healthy (Здорові): неінфіковані клітини, які можуть заразитися при контакті з інфікованими.

2. Latent (Латентні): інфіковані клітини, що не передають інфекцію та не можуть заразитися повторно.

3. Active (Хворі): клітини, які активно поширюють інфекцію та можуть перейти в латентний стан або загинути.

4. Dead (Мертві): клітини, що не взаємодіють з іншими.

Нехай множина клітин у моделі позначається як $A = \{a_i\}_{i=1}^N$, де N – загальна кількість клітин. Кожна клітина a_i має такі атрибути:

1. st : стан здоров'я агента, $st \in \{S, L, I, D\}$, де S – здорові, L – латентні, I – активні хворі, D – мертві.

2. t_{st} : час, який визначає, скільки часу клітина перебуває в поточному стані.

3. P_{inf} : що описує ймовірність зараження при контакті з іншою клітиною.

4. P_{pi} : ймовірність перейти в активний стан, при зараженні (P_{inf}).

5. P_{pd} : ймовірність смерті агента в разі перенесення туберкульозу.

Ймовірності переходів між станами були взяті зі статті «Застосування геопросторової мультиагентної системи для моделювання різних аспектів передачі туберкульозу» [3], де ймовірність переходу здорової клітини 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 клітини в латентний стан та ймовірність смерті інфікованої клітини:

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

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

Зміни станів клітин відбуваються відповідно до схеми, наведеної на рисунку 1 [2].

- При контакті зі хворою клітиною здорова заражається з динамічною ймовірністю P_{inf} .

- У разі зараження здорова клітина переходить в активний або латентний стан: з ймовірністю 10% вона стає активною, а з 90% – латентною.

- Після завершення інфекційного періоду хворі клітини переходять у стан мертвих або латентних: з ймовірністю 10,4% клітина гине, а з 89,6% – стає латентною.

Розповсюдження хвороби. Інфекція поширюється через взаємодію сусідніх клітин. Якщо активна клітина має здорову клітину в межах свого радіусу зараження (“Cell Infection Radius”),

то передача інфекції відбувається з ймовірністю P_{inf} . Процес зараження здійснюється кожні “Check Infection Each (n) Iteration”.

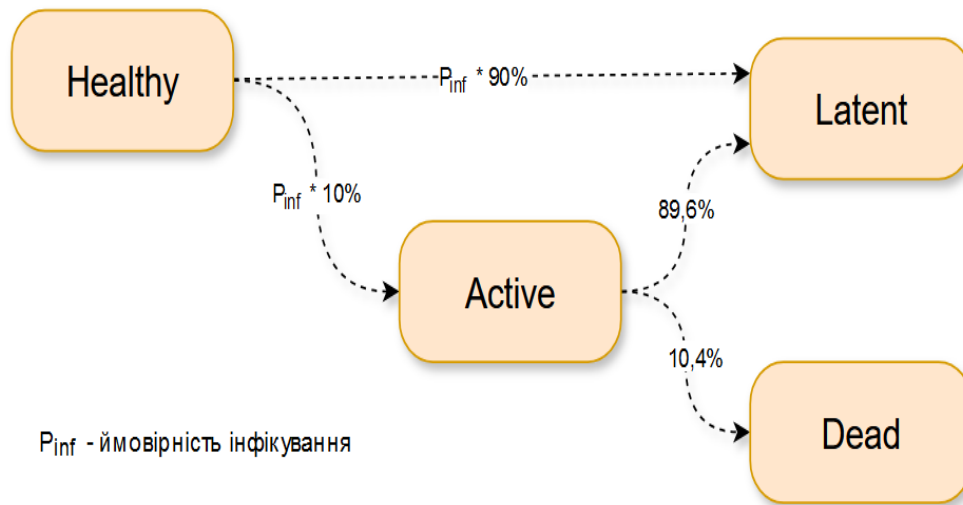


Рис. 1. Блок-схема моделі

Динамічна ймовірність зараження (P_{inf}). Ймовірність зараження визначається на основі часу перебігу інфекції. Ймовірність зараження залежить від дня перебігу хвороби як показано на рисунку 2.

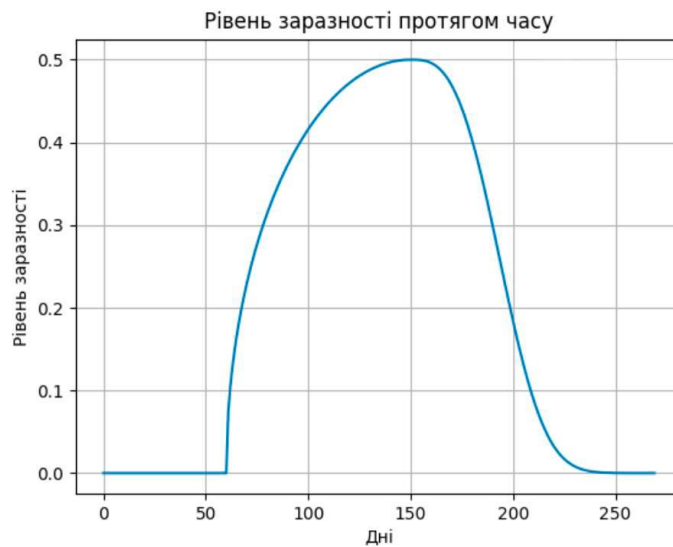


Рис. 2. Графік ймовірності зараження

Якщо $day \leq c$:

$$x = \frac{c-day}{a}, \text{ res} = \begin{cases} \sqrt{1-x^2}, & \text{якщо } x^2 \leq 1 \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Якщо $day > c$:

$$x = \frac{day-c}{b \cdot (1+0,2 \cdot (in_{con}-1))}, \text{ res} = e^{-|x|^3};$$

$$P_{inf}(day) = \text{res} \cdot z \cdot l;$$

$$\begin{cases} I = 1, & \text{якщо } in_{con} = 1, \\ I = in_{con} \times 0,2, & \text{якщо } in_{con} \neq 1. \end{cases}$$

де:

1. day – день відносно початку інфекції;
2. c – день пікової заразності, становить 150;

3. a – масштабування зменшення заразності до піку, становить 90;
4. b – масштабування зменшення заразності після піку, становить 50;
5. z – максимальний рівень заразності, становить 0.5;
6. in_con – початковий рівень контакту (за умовчанням дорівнює 1);
7. l – модифікований рівень контакту

Валідація моделі. Валідація моделі є критичною для коректного моделювання поширення захворювання. Щоб узгодити симуляцію з реальними часовими шкалами, проводиться експеримент: модель ініціюється із здоровими клітинами та кількома активними інфікованими, без переходу з латентного стану в активний. Інфіковані клітини лише передають інфекцію, і після завершення циклу інфікування підраховується кількість латентних. Валідація вважається успішною, якщо один активний інфікований заражає від 10 до 15 здорових клітин.

Якщо модель не проходить валідацію, параметр *Cycles per Day* коригується до отримання відповідних результатів. Валідацію слід проводити після кожної суттєвої зміни параметрів для забезпечення точності та відтворюваності. Наприклад, на рисунку 3 зображено результати тестового експерименту – 10 активних інфікованих заразили 130 здорових клітин, що підтверджує коректність моделі.

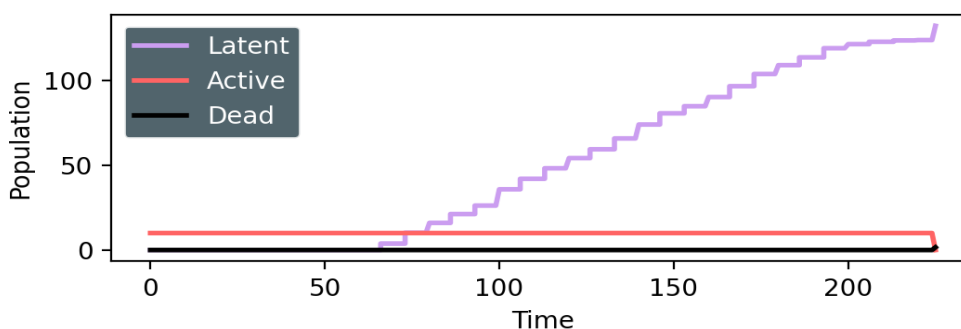
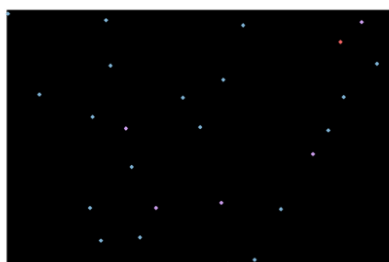


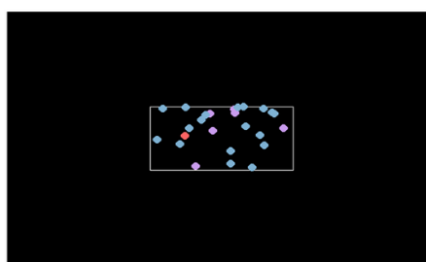
Рис. 3. Графік валідації моделі

Локації симуляції. Модель симуляції передбачає три типи середовищ (*Polygon type*), кожне з яких має свої особливості, що впливають на динаміку поширення хвороби. На рисунку 4 зображено середовища, використані для моделювання поширення туберкульозу: відкриту місцевість, офісне приміщення та окоп. Вони відтворюють різні умови взаємодії між агентами, що визначають особливості розповсюдження інфекції.



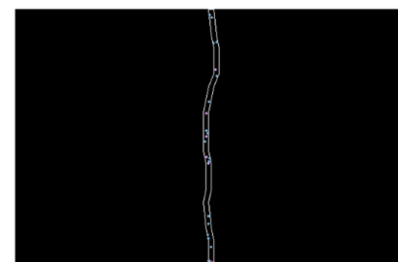
ВІДКРИТА МІСЦЕВІСТЬ

Велике, відкрите середовище, що сприяє інтенсивній взаємодії великої кількості клітин. Використовується для моделювання міських умов або регіонів із високою щільністю населення. Також застосовується для валідації моделі завдяки можливості відтворення різних сценаріїв поширення інфекції.



ОФІСНЕ ПРИМІЩЕННЯ

Обмежене закрите середовище з малою площею, геометрично представлене у вигляді прямокутника.



ОКОП

Вузьке, звивисте середовище зі складною геометриєю, що імітує просторові обмеження. Площа відповідає площі офісного приміщення.

Рис. 4. Середовища моделювання поширення туберкульозу

Дана модель дозволяє дослідити вплив просторових умов, динаміки міжособистісних контактів та індивідуальних параметрів на рівень поширення туберкульозу. Результати

моделювання сприяють оцінці ризиків інфікування залежно від типу середовища та специфіки просторової організації.

Аналіз результатів та обговорення. Проведено експеримент із використанням клітинного автомата для моделювання поширення захворювання в популяції за різних початкових умов.

У першій серії експериментів середовище моделювалося як відкрита територія (Open area), що забезпечувало вільну взаємодію клітин без фізичних бар'єрів, що імітує умови великого скупчення людей. Початкова кількість хворих із активною формою становила 10 осіб, а загальна кількість клітин у системі дорівнювала 1500 (Рис. 5):

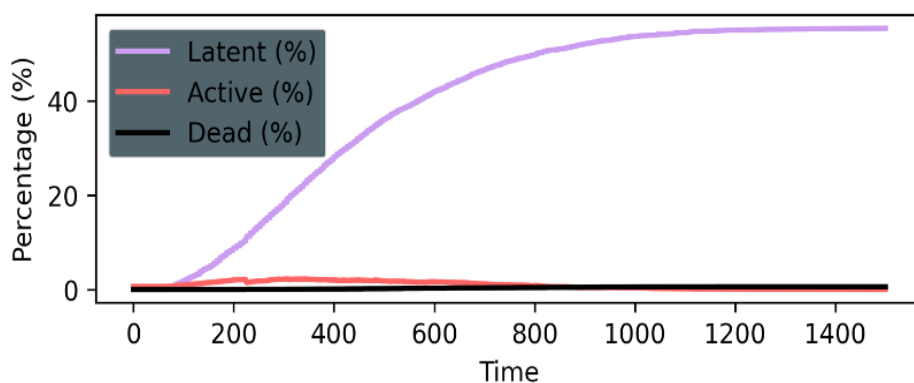


Рис. 5. Динаміка поширення туберкульозу для відкритої території

У другому експерименті (офісне приміщення) кількість латентних хворих становила 25% від загальної кількості клітин (Рис. 6):

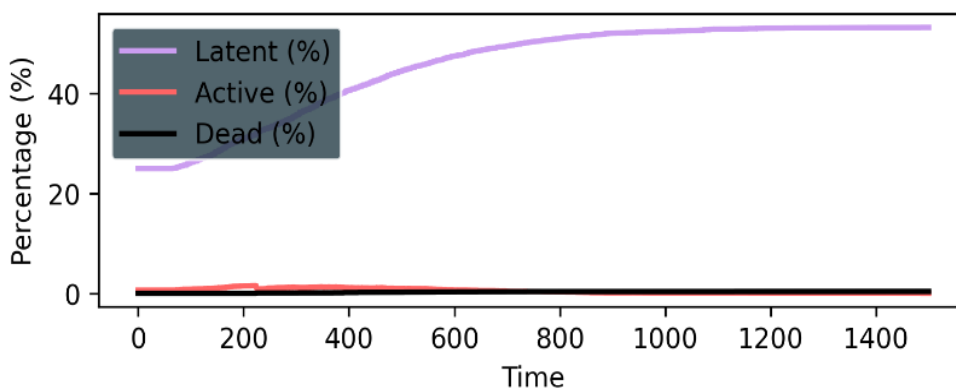


Рис 6. Динаміка поширення туберкульозу для офісного приміщення

У третій серії експериментів (окоп) частка латентних хворих була збільшена до 50% від загальної кількості клітин (Рис. 7):

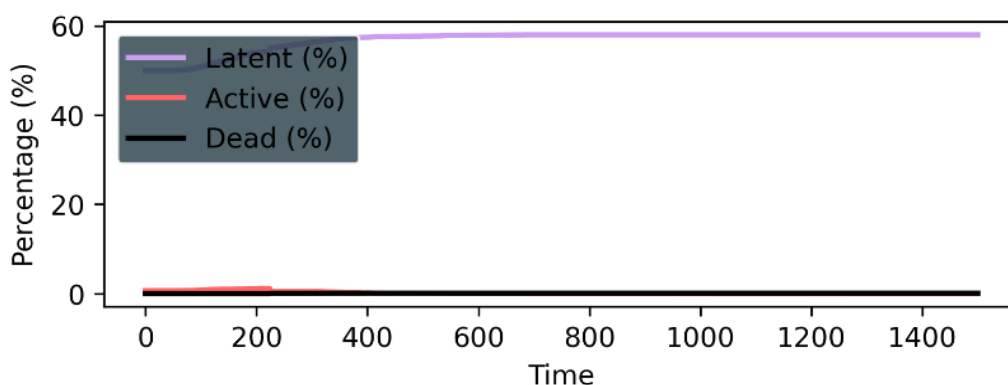


Рис 7. Динаміка поширення туберкульозу для окопу

Результати експериментів дозволяють порівняти вплив різних початкових часток латентних хворих на динаміку поширення захворювання. Моделювання у відкритій системі (Open area) показало, що графік зараження має схожу поведінку незалежно від початкового рівня латентних хворих (0%, 25%, або 50%). Після швидкого зростання кількість заражених стабілізується на рівні плато (52%-54% латентних), що свідчить про обмеження нових заражень через брак здорових клітин для взаємодії.

Збільшення початкової частки латентних хворих прискорює досягнення плато, проте не змінює кінцевий рівень зараження. Це вказує на потенційно захисну роль латентного стану, який обмежує активну фазу хвороби. Отримані дані підтверджують коректність моделі для різних умов, відкриваючи можливості її застосування для дослідження поширення захворювання в інших середовищах, наприклад, у закритих просторах або траншеях.

Проведено другу серію експериментів у різних середовищах: відкритій системі (Open area), закритому приміщенні (Office) та вузькому обмеженому просторі (Trench) за умов відсутності латентних на початку симуляції. Змодельовано динаміку змін кількості хворих, латентних, здорових та мертвих клітин. Графіки демонструють характерні відмінності в поширенні захворювання залежно від просторових обмежень, що дозволяє оцінити їхній вплив на перебіг епідемії.

У першому експерименті симуляція проводилася у відкритій системі (*Open area*) із загальною кількістю клітин 1500. Початкові умови включали 10 хворих з активною формою захворювання, при цьому кількість латентних клітин становила 0% (Рис. 8):

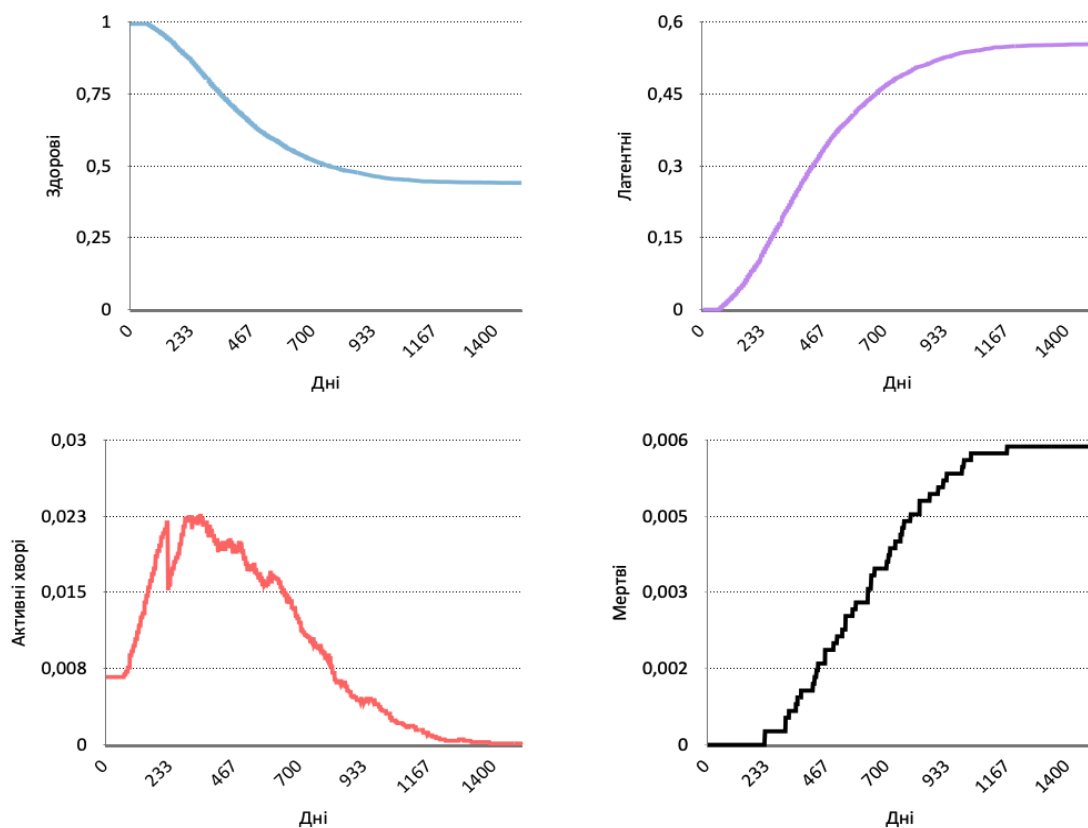


Рис 8. Графіки першого експерименту у відкритій місцевості (*Open area*)

У другому експерименті симуляція проводилася в закритій системі, що моделює офісне середовище (*Office*), із загальною кількістю клітин 25. Початкові умови включали 1 хворий з активною формою захворювання, тоді як кількість латентних клітин становила 0% (Рис. 9).

У третьому експерименті симуляція проводилася у вузькому та обмеженому середовищі, що моделює умови траншеї (*Trench*), із загальною кількістю клітин 25. Початкові умови включали 1 хворий з активною формою захворювання, тоді як кількість латентних клітин становила 0% (Рис. 10).

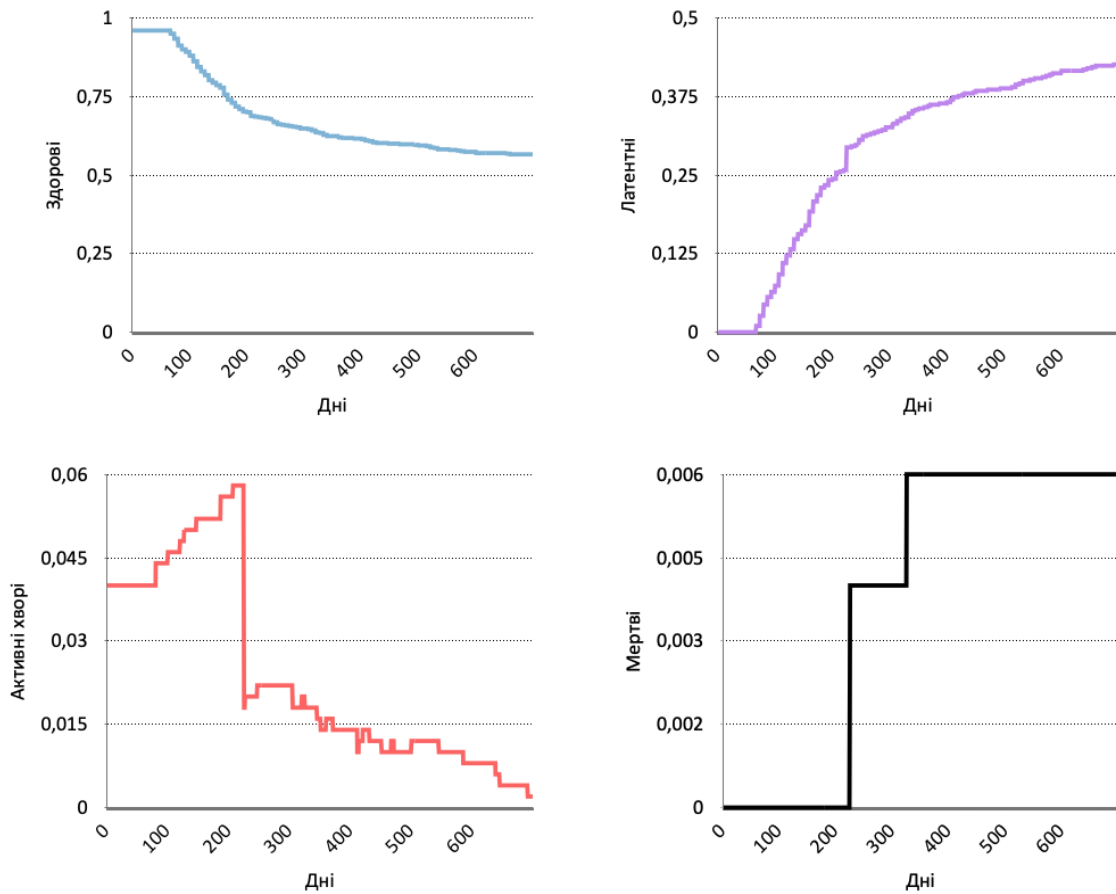


Рис 9. Графіки другого експерименту в офісному приміщенні (Office)

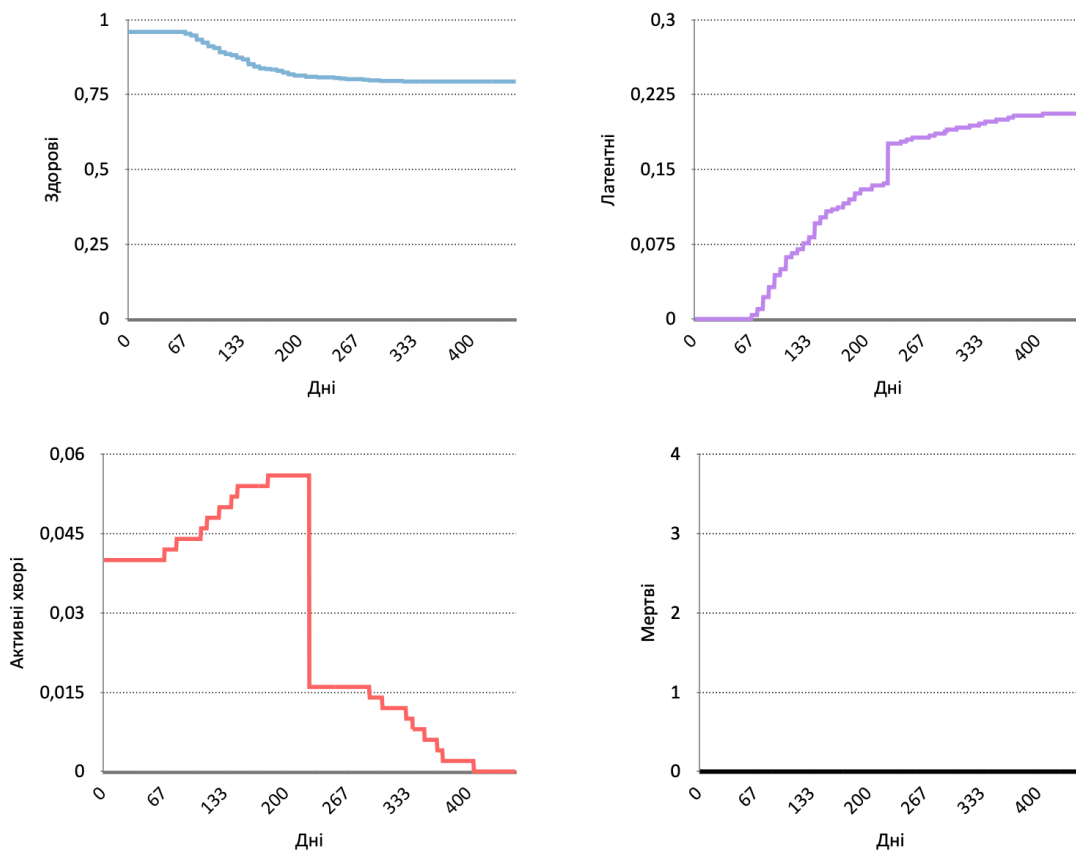


Рис 10. Графіки третього експерименту в окопі (Trench)

Висновки за результатами симуляції. Моделювання виявило суттєві відмінності у динаміці поширення туберкульозу залежно від типу середовища:

1. Піковий рівень активних хворих: у середовищах «Офіс» і «Окоп» максимальна частка активних хворих досягає приблизно 6%, тоді як на відкритій території (Open Area) цей показник становить лише 2,3%.

2. Тривалість активної фази: в офісі активна фаза захворювання триває до 650 днів, тоді як у вузькому просторі (окопі) вона завершується до 400-го дня, після чого хворі переходять у латентний стан або одужують.

3. Частка латентних хворих: пікова частка латентних хворих в офісі досягає 42,6%, що майже вдвічі перевищує аналогічний показник для окопу (20,6%). На обох локаціях кількість латентних швидко зростає на початкових етапах і досягає стабільного рівня.

Висновки

У дослідженні було розроблено та проаналізовано модель поширення туберкульозу в закритих приміщеннях із використанням рухомих клітинних автоматів. Використання цього підходу дозволило врахувати мобільність інфікованих осіб, просторові особливості середовища, а також стохастичний характер передачі інфекції.

Розроблена математична модель передбачає чотири стани клітин (здорові, латентні, активні хворі та мертві) та ймовірнісні правила їх переходу. Валідація моделі засвідчила її відповідність реальним епідеміологічним даним: один активний інфікований заражав у середньому від 10 до 15 здорових клітин.

Результати числових експериментів показали:

- У відкритій системі (Open Area) максимальний рівень зараження становив 52-54% популяції, а динаміка захворюваності стабілізувалася після досягнення плато.

- В умовах офісного приміщення (Office) та траншеї (Trench) спостерігалися значні відмінності у динаміці поширення. Піковий рівень активних хворих у закритих приміщеннях досягав 6%, тоді як у відкритому середовищі — лише 2,3%.

- Тривалість активної фази хвороби варіювалася залежно від просторових обмежень: в офісному середовищі вона тривала до 650 днів, а в траншеї — до 400 днів.

- Пікова частка латентних хворих у закритому середовищі сягала 42,6%, що майже вдвічі перевищувало аналогічний показник для траншеї (20,6%).

Отримані результати підтверджують важливість врахування геометрії середовища при прогнозуванні поширення інфекційних хвороб. Закриті простори сприяють тривалій циркуляції активних хворих, тоді як обмежені локації можуть сповільнювати передачу інфекції.

Запропонована модель може бути використана для аналізу ефективності профілактичних заходів, таких як оптимізація вентиляційних систем та розробка стратегій карантинних обмежень у приміщеннях із високим ризиком поширення туберкульозу.

Список використаних джерел:

1. Статистика захворюваності на ТБ в Україні. Центр громадського здоров'я. URL: <https://phc.org.ua/kontrol-zakhvoryuvan/tuberkuloz/statistika-z-tb>.

2. World Health Organization. *Latent tuberculosis infection. Updated and consolidated guidelines for programmatic management*. 2018.

3. Сем'янів І. О., Тодоріко Л. Д., Виклюк Я. І., Невінський Д. В. *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. Європейський центр з профілактики та контролю захворювань. URL: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/tuberculosis-surveillance-and-monitoring-europe-2022-2020-data>.

5. Vyklyuk Y., Semianiv I., Nevinskyi D., Todoriko L., Boyko N. *Applying geospatial multi-agent system to model various aspects of tuberculosis transmission*. New Microbes and New Infections Journal. 2024. Т.59. DOI:10.1016/j.nmni.2024.101417.

6. 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. T.27, №1. С. 86-88. DOI:10.5588/ijtld.22.0563.
7. Vyklyuk Y., Nevynskyi D., Boyko N. *GEOCITY — A new dynamic-spatial model of urban ecosystem*. Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijić” SASA. 2023. T.73, №2. С. 187-203. DOI: 10.2298/IJGI2302187V.
8. Mabud T. S., Alves M. L. D., Ko A. I., Basu S., Walter K. S., Cohen T., Mathema B., Colijn C., Lemos E., Croda J., Andrews J. R. *Evaluating strategies for control of tuberculosis in prisons and prevention of spillover into communities: An observational and modeling study from Brazil*. PubMed. 2019. T.16, №1. DOI:10.1371/journal.pmed.1002737.
9. Todoriko L.D., Andriets O.A., Vyklyuk Y.I., Semyaniv I.O., Margineanu I., Lesnic' E., Nevinsky D.V., Yeremenchuk I.V. *Prospects for the use of artificial intelligence to predict the spread of tuberculosis infection in the WHO European Region*. ТУБЕРКУЛЬОЗ ЛЕГЕНЕВІ ХВОРОБИ ВІЛ-ІНФЕКЦІЯ. 2023. Т.53, №2. С. 86-92. DOI:10.30978/TB2023-2-86.
10. WHO consolidated guidelines on tuberculosis. *Module 3: diagnosis – rapiddiagnostics for tuberculosis detection* . 2021.
11. Невінський Д. В., Сем'янів І. О., Виклюк Я. І. Вивчення зв'язку між туберкульозом та соціально-економічними, медичними, демографічними чинниками в Україні. URL: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.81.2013>.
12. *World Health Organization Data*. 2022. URL: <https://www.who.int>.
13. Brauer F., Castillo–Chavez C., Feng Z. *Mathematical models in epidemiology*. 2019.
14. Hrizi O., Gasmi K., Ben Ltaifa I., Alshammari H., Karamti H., Krichen M., Ben Ammar L., Mahmood A. *Tuberculosis disease diagnosis based on an optimized machine learning model*. *Journal of Health Engineering*. 2022. DOI: 10.1155/2022/8950243.
15. Sameera Abar, Georgios K. Theodoropoulos, Pierre Lemariner, Gregory M.P. O'Hare. *Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software*. COMPUTER SCIENCE REVIEW JOURNAL. 2017. T.24. С. 13-33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>.

Автори статті

Невінський Денис – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

ORCID: 0000-0002-0962-072X

Сем'янів Ігор – кандидат медичних наук, доцент, Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна.

ORCID: 0000-0003-0340-0766

Виклюк Ярослав – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

ORCID: 0000-0003-4766-4659

Authors of the article

Nevynskyi Denys – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-0962-072X

Semyaniv Ihor – Candidate of Sciences (medical), Associate Professor, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine.

ORCID: 0000-0003-0340-0766

Vyklyuk Yaroslav – Doctor of Sciences (technical), Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ORCID: 0000-0003-4766-4659

Надійшла до редакції: 17.02.2026

Прийнята до друку: 15.03.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Невінський Д.В., Сем'янів І.О., Виклюк Я.І.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>