

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»
Кафедра інформатики факультету інформатики

МОДЕЛЮВАННЯ ПАНДЕМІЙ З ДОПОМОГОЮ АГЕНТНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Текстова частина до курсової роботи
за спеціальністю „Інженерія програмного забезпечення” 121

Керівник курсової роботи
Доктор фіз.-мат. наук,
професор

(прізвище та ініціали)

(підпис)

“__” _____ 2021 р.

Виконав студент _____

(прізвище та ініціали)

“__” _____ 2021 р.

Київ 2021

Зміст

ВСТУП	3
1 Ознайомлення із предметною областю	5
1.1 Важливість моделювання пандемій на прикладі пандемії вірусу грипу 2009 року	5
1.2 Застосування агентного підходу до імітаційного моделювання процесу поширення захворювання	10
1.2.1 Класичні моделі епідемій.....	10
1.2.2 Агентний підхід.....	14
1.2.2.1 Моделювання процесів поширення захворювання на прикладі грипу А.....	15
1.2.2.2 Поведінка агентів.....	17
1.2.2.3 Застосування моделі поширення захворюваності грипу А ..	19
2 Математичні моделі поширення захворювань.....	21
3 Агентні середовища	27
3.1 Аналізовані середовища	27
3.2 Короткий опис інструментів	28
3.3 Критерії порівняння	28
3.4. Оцінка інструментів.....	33
4 Уточнення обраної моделі та програмного середовища	36
5 Програмна реалізація.....	40
ВИСНОВКИ.....	48
ЛІТЕРАТУРА	49
ДОДАТКИ.....	50

ВСТУП

Актуальність теми. Збереження і зміцнення здоров'я населення - важлива соціально-економічна проблема, невід'ємним аспектом якої є зниження інфекційної захворюваності. У вирішенні цього завдання попереджувальні заходи мають ключове значення. Прогнозування динаміки поширення захворювання дозволяє розробити і застосувати адекватні заходи протидії, забезпечити раціональне використання матеріальних і людських ресурсів. Інформаційною основою прогнозу в даній області служать статистичні дані, регулярно одержувані відповідними структурами.

Якісний прогноз поширення захворювання можна досягти тільки на основі адекватних математичних моделей. На жаль, традиційні моделі розповсюдження захворювань використовують допущення (наприклад, однотипність індивідумів, їх безперервне рівномірне перемішування на території, що моделюється), що роблять результати прогнозування з їх допомогою недостатньо точними. З оглядом на останні досягнення в області математичного і імітаційного моделювання, формування моделей, що не володіють такими обмеженнями, є в даний час завданням, що цілком може бути реалізовано.

Проблема моделювання поширення захворювань вирішується давно (початок застосування математичних методів при вивченні епідемій було покладено в середині XVII ст.). За цей час методи моделювання захворювань багаторазово удосконалювалися, з'являлися різноманітні варіанти моделей, що так чи інакше відображають особливості досліджуваних процесів, однак зробити висновок, що поставлена задача вирішена, поки не можна.

Метою дослідження є створення моделі розповсюдження інфекційних захворювань з допомогою агентного підходу. Для цього необхідно вирішити такі **завдання**:

- 1) аналіз існуючих моделей поширення захворювань і методів прогнозування поширення інфекції, виявлення їх основних обмежень;

2) вибір сучасного підходу до моделювання поширення захворювань, що дозволяє подолати обмеження традиційних моделей;

3) створення математичної моделі територіального поширення захворювання на основі обраного підходу;

4) програмна реалізація комп'ютерної моделі поширення захворювання для отримання прогнозу в автоматичному режимі;

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися методи теорії ймовірностей і математичної статистики: теорія перевірки гіпотез, теорія випадкових процесів, кореляційний аналіз, регресійний аналіз і методи теорії оцінювання. Розроблена модель заснована на методах імітаційного моделювання, зокрема, агентного моделювання, її реалізація - на принципах об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

Практична цінність результатів роботи.

1 Ознайомлення із предметною областю

1.1 Важливість моделювання пандемій на прикладі пандемії вірусу грипу 2009 року

Незабаром після пандемії вірусу грипу A(H1N1)pdm09 в Північній Америці в 2009 році Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) створила неформальну мережу математичного моделювання з груп академічних експертів і фахівців з моделювання в сфері охорони здоров'я. Ця мережа працювала спільно, щоб охарактеризувати динаміку та вплив пандемії та продемонструвати потенційний результат різних втручань у різних умовах. Ця робота була опублікована у форматах, придатних для різних аудиторій, включаючи технічних експертів, політиків та широку громадськість. Акцент був зроблений на адаптації та інтерпретації досвіду з розвинутих країн для застосування в умовах низьких рівнів ресурсів. [1]

Міністерства охорони здоров'я та уряди використовували математичні моделі для інформування при плануванні пандемії грипу у багатьох розвинених країнах. Припущення щодо планування - при якому тяжкість захворювання (наприклад, коефіцієнт випадків смертності) та характеристики передачі (наприклад, основне репродуктивне число, R_0) вірусу грипу базуються на минулих пандеміях (наприклад, 1918, 1957, 1968) або потенційних пандемічних вірусних штаммах (наприклад, високопатогенний пташиний грип підтипу H5N1) - змодельовані для оцінки потенційної траєкторії захворюваності інфікованих та летальних випадків та ймовірного впливу заходів боротьби. Така інформація дає змогу визначити необхідні медичні та немедичні втручання, доцільність утримання та оптимальний розмір запасу ліків та найкраще використання фармацевтичних препаратів після початку пандемії.

Під час пандемії A(H1N1) 2009 року члени спільноти з моделювання грипу тісно співпрацювали з державними установами охорони здоров'я та міністерствами охорони здоров'я. Зусилля спрямовані на швидке кількісне

визначення передачі, щоб надати докази змін фази пандемії ВООЗ; оцінка тяжкості та сезонності; інтерпретація епідеміологічних тенденцій з часом; вимірювання антигенних змін у вірусі та оцінка потенційного впливу втручань. Моделі в установах державної охорони здоров'я також надали вклад у розробку досліджень та допомогли визначити ключові дані для вирішення проблем охорони здоров'я.

Хоча математичне моделювання було використано для цілей планування та вивчення варіантів пом'якшення наслідків у багатьох країнах Америки (наприклад, Канаді, Мексиці та Сполучених Штатах Америки), Європі (наприклад, Франції, Німеччині, Нідерландах та Сполученому Королівстві Великобританії та Північної Ірландії), Азії (наприклад, Китаю та Японії) та Тихого океану (Австралії та Нової Зеландії), це було не складне імітаційне моделювання, а статистичний аналіз у реальному часі, заснований на механістичних моделях передачі та інтерпретації нових епідеміологічних та вірусологічних даних, які найчастіше інформували щоденні політичні рішення. Ці результати широко поширювались у рецензованих публікаціях, проте велика частина порад та вказівок, вироблених в результаті моделювання, ніколи не була офіційно опублікована, а була представлена натомість під час очних зустрічей з державними керівниками, з випадковими документами у протоколах засідань або звітів.

Дослідження раннього спалаху дали дані, які виявились критично важливими для характеристики епідеміології інфекції A(H1N1)pdm09 у громадах, школах та домашніх господарствах. Вони дали можливість оцінити R_0 , серійні інтервали та вікові частоти клінічних нападів, а також відстежувати часовий розподіл вторинних інфекцій. Ці параметри були важливими для оцінки інфекції A(H1N1)pdm09 та тяжкості захворювання. Ранні експрес-аналізи з обмеженими даними, що проводились для інформування політичних рішень, супроводжувались більш детальними дослідженнями, які використовували більш надійні та повні дані. Наприклад, ретроспективний аналіз загальнодоступних епідеміологічних та

вірусологічних даних з кількох країн дав унікальну можливість порівняти поширення одного і того ж вірусу в різних країнах та визначити, чи впливали різниця в широті, температурі, вологості, віковій структурі населення або структурі змішування на динаміку розповсюдження інфекції.

Результати математичного моделювання сильно вплинули на політичні рішення щодо оптимального використання, ефективності та економічної ефективності фармацевтичних препаратів (наприклад, протівірусних препаратів або вакцин) та немедикаментозних заходів (наприклад, закриття шкіл, заходи соціального дистанціювання, маски). Оскільки на початку пандемії 2009 року (а в деяких країнах і протягом всієї пандемії) антивірусні препарати та вакцини були дефіцитними або недоступними у багатьох країнах, моделювання дало вказівки щодо оптимального використання таких втручань для зменшення передачі шляхом націлення на дітей шкільного віку та інших передавачів високого рівня заразності, для зменшення захворюваності та смертності шляхом орієнтації на осіб високого ризику, таких як ті, хто має хронічні захворювання, або вагітних жінок.

Закриття школи було політичним варіантом, який розглядався в деяких країнах. Хоча A(H1N1)pdm09 спричиняв більш слабкі захворювання, ніж спочатку очікувалось, деякі країни, такі як Аргентина та Японія, закрили всі школи на початку епідемії шляхом продовження чи перекриття шкільних канікул, тоді як інші закрили лише певні школи. Моделювання виявилось корисним для зважування потенційних переваг від закриття шкіл для здоров'я та їх соціальних та економічних витрат. Під час пандемії модельні групи в декількох країнах, включаючи Австралію, Китай (Гонконгський спеціальний адміністративний регіон), Францію, Японію, Нідерланди, Великобританію та США, конфіденційно передавали неопубліковані результати з ВООЗ та іншими державами-членами ВООЗ через Мережу математичного моделювання ВООЗ для інформування при прийнятті рішень.

Важко достовірно оцінити важливість моделювання прийняття обґрунтованих рішень під час пандемії 2009 року. Це пояснюється тим, що

моделювальники та біостатисти в більшості країн надавали поради як частину високоінтерактивних мультидисциплінарних консультативних груп, внески яких часто складалися з представлення офіційних результатів моделювання та механістичної динамічної точки зору на розгортання епідемії. Крім того, політикам потрібно було зважити не тільки на потенційні переваги для здоров'я від різних заходів, але також економічні, соціальні, політичні та етичні втрати, пов'язані з певними варіантами політики. Безперечним, однак, є те, що знання, отримані в результаті статистичного моделювання, обґрунтовували політику багатьох країн.

Незважаючи на добрі досягнення, залишається кілька проблем. Для встановлення реалістичних очікувань важливим є покращення комунікації між політиками та громадськістю щодо того, що моделювання може, а що не може. Також важливо ефективно повідомляти, чим прогнозування відрізняється від моделювання сценаріїв. Сценарії корисні при плануванні для оцінки ефективності втручань та різних варіантів політики, але вони не є прогнозами. Нездатність повідомляти про невизначеність була проблематичною і призвела до нерозуміння результатів моделювання під час пандемії 2009 року.

Політичний тиск під час пандемії 2009 року був інтенсивним. Наявні дані часто не відповідали інформаційним потребам політиків. Ключові рішення, наприклад, скільки вакцин купувати, повинні були бути прийняті, незважаючи на велику невизначеність щодо ймовірного загального впливу пандемії на здоров'я. Аналізи, що проводяться в режимі "реального часу" з використанням обмежених даних, завжди піддаються суттєвій невизначеності, а центральні оцінки та оцінки в гірших випадках незмінно можуть змінюватися у міру того, як стають доступними більше даних.

Як і очікувалось, фундаментальні прогалини даних на початку пандемії, особливо щодо рівня зараження населення з часом, ускладнили точну оцінку її впливу та тяжкості захворювання. Багато країн мали надійні та своєчасні дані про попит на первинну медичну допомогу через

грипоподібну хворобу, але дуже обмежені дані про частку осіб, які заразились та звертались за медичною допомогою. Як результат, кількість симптоматичних випадків, які звертались за медичною допомогою, не могла бути використана для оцінки загальної частоти зараження грипом у громаді. Дані сероспостереження в реальному часі могли заповнити цю прогалину, але таких даних не було в жодній країні до першого піку пандемічної грипозної активності. Інші прогалини даних також ускладнювали оцінку ймовірного впливу сезонних коливань на передачу або ефективність багатьох нефармацевтичних втручань, особливо в умовах низьких ресурсів.

Декілька важливих уроків було витягнуто з пандемії 2009 року. Головним серед них є те, що моделювання не замінює дані. Швидше, моделювання забезпечує засіб для оптимального використання наявних даних та для визначення типу додаткової інформації, необхідної для вирішення питань, що стосуються політики. Однак ми не повинні сприймати занадто негативний погляд на досягнення у 2009 році. Моделісти надали кількісні рамки для аналізу даних спостереження та розуміння як динаміки пандемії, так і впливу втручань. Можна стверджувати, що саме такий своєчасний, але простий аналіз та інтерпретація даних найбільше вплинули на політичні рішення, прийняті протягом перших місяців пандемії, а не складне імітаційне моделювання типу пандемії, що використовується для допандемічного планування.

1.2 Застосування агентного підходу до імітаційного моделювання процесу поширення захворювання

1.2.1 Класичні моделі епідемій

Найбільш відомий в вітчизняних колах метод моделювання епідемій заснований на використанні диференціальних рівнянь. У цих моделях динаміка поширення захворювання описується системою диференціальних рівнянь, де в якості змінних станів виступають числа хворих і здорових людей на території, що моделюється. Рішення такої системи рівнянь дає рівень інфекційної захворюваності в кожен момент модельного часу. Дана методологія була розроблена в 1960-ті рр. в СРСР академіком О.В. Барояном і професором Л.А. Рвачевим. Для її створення використовувався метод наукової аналогії епідемічного процесу («перенесення» збудника інфекції від хворих до здорових) процесу «перенесення» матерії (енергії, імпульсу та ін.), описуваного рівняннями математичної фізики. [2]

У моделі Бароян-Рвачева і в більшості інших моделей такого типу вся популяція на території, що моделюється, ділиться на групи. Зазвичай виділяють чотири групи людей:

- 1) Susceptible – здорові люди, сприйнятливі до захворювання (позначимо їх кількість S);
- 2) Exposed - люди, захворювання у яких знаходиться в інкубаційному періоді (позначимо їх кількість E);
- 3) Infectious - інфекційні хворі (позначимо їх кількість I);
- 4) Recovered – люди перехворілі захворюванням, що моделюється, більш до нього не сприйнятливі (позначимо їх кількість R).

Приріст числа людей в кожній з виділених груп можна описати за допомогою наступної системи нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь в частинних похідних:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\lambda}{p(t)} S(t) \int I(t, \tau) d\tau;$$

$$\frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial \tau} = -\gamma(\tau)E(t, \tau);$$

$$\frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial \tau} = \gamma(\tau)E(t, \tau) - \delta(\tau)I(t, \tau);$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \int \delta(\tau)I(t, \tau)d\tau,$$

де t - календарний час розвитку епідемії;

λ – середня частота передачі збудника від інфікованих хворих до чутливих індивідів;

p - чисельність популяції;

τ - локальний час, що минув з моменту зараження індивіда;

$\gamma(\tau)$ - функція розвитку періоду інкубації;

$\delta(\tau)$ - функція розвитку інфекційного періоду.

У 1960-і-1970-і рр. модель Бароян-Рвачева була проривом в області моделювання епідемій. Модель має ряд позитивних якостей, що дозволяють застосовувати її і сьогодні. Головне достоїнство моделі – здатність досить точно відображати деякі аспекти епідемії при відносній простоті моделі. Завдяки своїй простоті, модель може легко бути реалізована як в будь-якій системі комп'ютерної математики, так і на цільовій мові програмування. Модель не вимагає великих обчислювальних витрат, і експерименти з нею можуть бути проведені майже на будь-якому персональному комп'ютері. Незважаючи на те що модель Бароян-Рвачева створювалася для моделювання поширення грипу, методологія її побудови може бути використана (і вже була використана) для моделювання поширення більшості інфекційних захворювань.

Модель Бароян-Рвачева породила цілий напрям в розробці моделей епідемій. Назвемо цей напрямок класичним, традиційним.

Сучасні обчислювальні комплекси і підходи до моделювання дозволяють розглядати більш тонку структуру досліджуваних процесів і, зокрема, враховувати в моделі вплив тих факторів, включення яких в традиційні моделі не представлялося можливим. Розглянемо докладніше ці

додаткові можливості сучасного моделювання складних процесів в порівнянні з функціональними можливостями традиційних моделей.

Класичні моделі, засновані на диференціальних рівняннях, повністю детерміновані. Але природа епідемічних процесів носить імовірнісний (стохастичний) характер. На динаміку розвитку цих процесів впливає безліч випадкових факторів, що призводять до того, що в загальному випадку ми спостерігаємо випадковий процес поширення захворювання. Нехтуючи цим, можна отримати дуже грубі або помилкові оцінки ресурсів, а вони необхідні для проведення протиепідемічних заходів. Стохастична модель на відміну від детермінованої дозволяє оцінити ймовірність того чи іншого розвитку епідемії, оцінити ризики виникнення несприятливих подій при певних адміністративних діях. Під час створення моделі Бароян-Рвачева реалізація стохастичних моделей стикалася з непереборними обчислювальними труднощами, які в даний час можуть бути успішно подолані.

Інша особливість класичного підходу полягає в наступному допущенні: в традиційних моделях передбачається, що всі індивіди на території, що моделюється, безперервно і рівномірно перемішуються. Ця умова прийнятна в якості першого наближення, проте ясно, що воно являє собою серйозне спрощення. Насправді реальні популяції, як правило, мають вкрай складну структуру, обумовлену соціальним розшаруванням, різноманітністю географічних умов, складними часовими і просторовими схемами переміщення. У цих умовах класичні моделі будуть давати скільки-небудь реалістичні результати тільки при моделюванні великих територій.

Крім зазначених вище особливостей класичного підходу відзначимо велику складність зміни моделей з метою врахування додаткових факторів. Основне практичне застосування моделей поширення захворювань полягає в побудові з їх допомогою систем підтримки прийняття адміністративних рішень щодо запобігання розвитку епідемії. Для цього в моделі повинно бути враховано вплив на поширення хвороби різних адміністративних політик (наприклад, проведення вакцинації, карантин і т.д.). Спочатку така

можливість в традиційних моделях відсутня, а спроби їх модернізації ведуть до необхідності розв'язання задачі ідентифікації (тарування) моделі. Подібне завдання вимагає чималих зусиль для свого вирішення.

Моделювання процесів, що розглядаються, розвивається і за кордоном. Велика частина сучасних зарубіжних досліджень в області моделювання епідемій ведеться в напрямку пошуку адекватних способів обліку в моделі соціальної структури популяції. Були зроблені спроби використовувати для цього системи диференціальних рівнянь більш складної структури, але поки вони не увінчалися успіхом. Найбільш перспективні сьогодні так звані «популяційні» моделі (population-based models). Це дискретно-подієві моделі, в яких відображена найпростіша структура суспільства: в популяції явно виділені індивіди різного віку, поширення захворювання між якими може статися тільки в рамках однієї «контактної» групи (contact group). «Контактні» групи визначаються характерною структурою суспільства, яка залежить від території, що моделюється. Наприклад, в одну «контактну» групу потраплять однокласники, товариші по службі, члени сім'ї, діти, які відвідують один дитячий сад, і ін.

Всі дискретно-подієві моделі - комп'ютерні. Дискретно-подієва модель на етапі виконання в кожний момент модельного часу являє собою деяку безліч змінних стану, що характеризує модель, а також список запланованих подій, які повинні відбутися в моделі в певній послідовності в майбутньому. Кожна подія - це деякий набір атомарних дій, наприклад перевірка логічних умов, зміна змінних стану моделі тощо. Зазвичай події породжуються різними паралельно працюючими і взаємодіючими між собою елементами моделі. Дискретно-подієва модель може описуватися різними способами: наприклад, вона може бути реалізована в деякій системі моделювання або просто являти собою програму на деякій мові програмування. Більшість сучасних середовищ візуального моделювання використовують для опису моделей власний синтаксис і елементи управління, вирішуючи основну задачу - реалізацію коректної роботи в моделі подіями, що відбуваються.

1.2.2 Агентний підхід

Далі представлений принципово новий для вітчизняної практики спосіб моделювання процесів поширення захворювань, заснований на агентному підході при побудові моделей складних процесів і систем. Цей підхід, розвинений останнім часом, заснований на обліку безлічі складових досліджуваного процесу, що протікають паралельно, кожна з яких при моделюванні описується сукупністю детермінованих і випадкових параметрів, що визначають особливості її «життєвого циклу».

Успіхи в розвитку підходів і середовищ розробки імітаційних моделей роблять їх практично безальтернативним шляхом підтримки прийняття рішень, що стосуються складних систем. Агентне (багатоагентне, мультиагентне) моделювання – останнє досягнення в області комп'ютерного імітаційного моделювання. Існує безліч визначень поняття агента і агентного підходу до моделювання. Спільним у всіх цих визначеннях є те, що агент - це деяка сутність, що володіє активністю, автономною поведінкою, що може приймати рішення відповідно до деякого набору правил і взаємодіяти з оточенням і іншими агентами. Агентні моделі використовуються для дослідження децентралізованих систем, динаміка функціонування яких не визначається глобальними правилами і законами, а навпаки, ці глобальні правила і закони є інтегральним результатом індивідуальної активності безлічі агентів. Як правило, агентні моделі - дискретно-подієві або, рідше, гібридні (дискретно-подієві з безперервними елементами).

Агентний підхід до імітаційного моделювання вже з успіхом випробуваний у багатьох областях знань, зокрема в соціології, економіці, екології. Відображенням результативності цього підходу є виділення в останні роки в складі різних громадських наукових дисциплін самостійних напрямків типу «обчислювальна економіка» (computational economics), «обчислювальна соціологія» (computational sociology) і т.п.

1.2.2.1 Моделювання процесів поширення захворювання на прикладі грипу А

У журналі "Науково-технічні відомості СПбПУ. Природні та інженерні науки" [2] розглядається сутність підходу на прикладі моделювання розвитку епідемії грипу А. Грип обраний в якості досліджуваного захворювання з двох причин. По-перше, грип – головна складова інфекційної захворюваності і смертності в усьому світі. В умовах постійної небезпеки виникнення нової пандемії грипу вивчення епідемій грипу і способів боротьби з ними надзвичайно актуально. По-друге, грип А - добре вивчене захворювання, відомі можливі форми його протікання, способи передачі вірусу. Крім цього існує докладна статистика захворюваності на грип в разі різних його епідемій, яка може бути використана для тарування і перевірки коректності моделі.

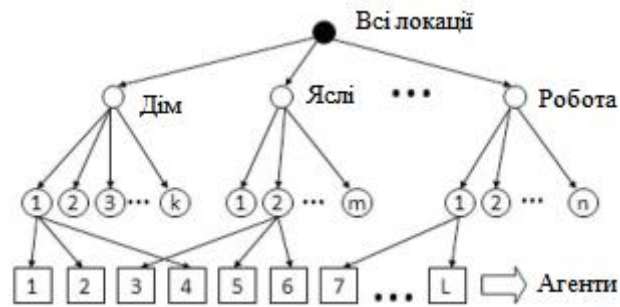
Побудовано агентна дискретно-подієва модель поширення грипу А на території одного міста (або району), яка буде відображати тільки ординарні («сезонні») епідемії грипу. Модель відображає число хворих на грип А в кожен момент модельного часу – в будь-який обраний день певного року. Для цього вихідні дані моделі враховують епідемічну обстановку в місті в початковий момент модельного часу.

Мета побудови моделі – отримання оперативного (на кілька тижнів вперед) прогнозу розвитку епідемії в місті на основі поточних статистичних даних захворюваності. Крім того, така модель дозволяє аналізувати поширення захворювання в умовах різних адміністративних впливів на розвиток епідемії.

В рамках агентного підходу введені в модель активні об'єкти – так звані «агенти», які характеризують поведінку однієї людини, що належить до однієї з груп. Основний параметр людини, що визначає його поведінку, - вік. Виділені 7 вікових груп: 0-2 роки, 3-6 років, 7-14 років, 15-24 років, 25-39

років, 40-64 року, 65 років і старше. Число агентів кожної вікової групи в моделі визначається демографічними даними по модельованій території (місто, район і т. Д.). Вікова група людини характеризує такі важливі фактори, що визначають вірогідність захворювання, як кількість контактів з іншими людьми в день, а також можливі місця перебування людини (школа, робота і т.д.).

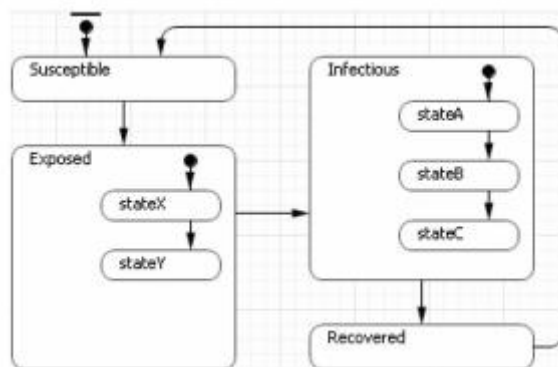
У моделі визначині два основних типи об'єктів – агенти і локації. Локація це об'єкт, що моделює можливе місцезнаходження агента. Кожен агент щодня згідно із своїм внутрішнім розкладом подій проводить певний час в різних локаціях. Наприклад, агент від 7 до 14 років може відвідувати такі локації, як «будинок», «школа» і «транспорт». Виділено вісім типів локацій: будинок, дитячі ясла, дитячий сад, школа, позашкільні заняття, вуз (а також середні професійні навчальні заклади та ін.), робота, громадський транспорт. При необхідності цей список може бути поповнений. Кількість різних місць перебування кожного типу в моделі визначається на основі загальної кількості агентів в моделі і середньої чисельності групи агентів, що зазвичай відвідують цю локацію. Наприклад, середній розмір класу в школі – близько 25 осіб. Тоді, якщо в моделі 100 агентів від 7 до 14 років, вони будуть відвідувати 4 класи. Слід зазначити, що розподіл агентів по всіх локаціях (крім громадського транспорту) фіксоване (тобто школяр кожен день ходить в один і той же клас, студент - в один і той же вуз і т.д.). Вся безліч локацій утворює навколишнє середовище для агентів (мал. 1). З точки зору уваги навколишнього середовища агентна модель поширення грипу може бути віднесена до «популяційних» моделей розповсюдження захворювань.



Мал. 1. Структура навколишнього середовища моделі

1.2.2.2 Поведінка агентів.

У статті також наведені основні етапи протікання захворювання у агента. Для подання цього процесу в моделі використаний стейтчарт (мал. 2). Стейтчарти (Statecharts, ведуть своє походження від карт стану Харелл) – поширений формалізм, який використовується в середовищах дискретно-подієвого моделюванні для завдання послідовності подій. Сенси основних станів агентів аналогічний прийнятому в класичних моделях. Стану «stateX» і «stateY» введені, щоб промодельювати стадії інкубаційного періоду – поки хворий не заразний («stateX») і коли він вже може заражати інших агентів («stateY»). Стану «stateA», «stateB» і «stateC» моделюють поступове зниження здатності до поширення захворювання в міру одужання агента.



Мал. 2. Протікання захворювання у агента

Переходи між усіма станами, крім переходу з «Susceptible» в «Exposed», здійснюються за тайм-аутом. Все тайм-аути параметрично

настроюються під модельований вид захворювання. Оскільки дана модель орієнтована на грип А, агент проводить в стані «Exposed» в середньому від 1 до 3 днів, в стані «Infectious» - від 6 до 8 днів, в стані «Recovered» - близько 4 тижнів.

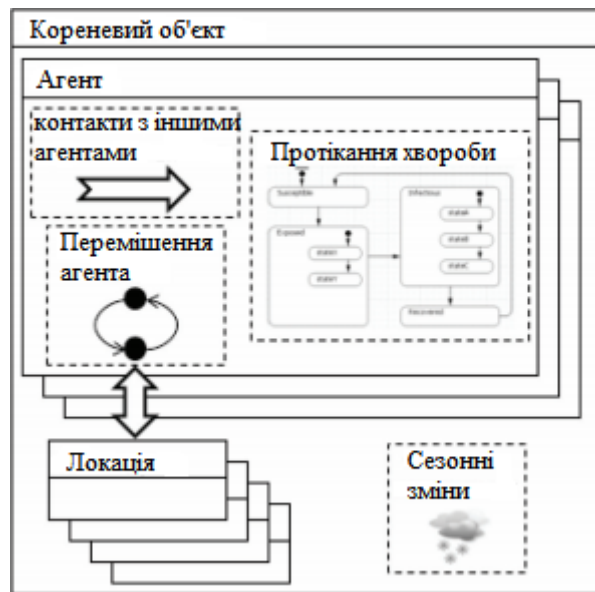
Перехід зі стану «Susceptible» в «Exposed» відбувається в разі передачі захворювання від одного агента до іншого, яка може статися в результаті події «контакт». Ця подія викликається з певною інтенсивністю хворими агентами, які перебувають в станах «stateY» або «Infectious». При «контакті» захворювання може бути передано з певною ймовірністю тільки здоровому агенту (в стані «Susceptible»), що знаходиться в тій же самій локації, що і хворий агент. Ймовірність передачі захворювання залежить від багатьох факторів, в тому числі від стадії захворювання хворого агента, пори року в моделі (погодних умов) та ін.

Загальна структура описаної моделі зображена на мал. 3. Безліч об'єктів типу «агент» і «локації» взаємодіють один з одним за допомогою кореневого об'єкта, що несе переважно допоміжні функції. У моделі можна виділити чотири основних види подій (динаміки). Велика їх частина породжується агентами, це:

- 1) події переміщення агента між локаціями;
- 2) події, пов'язані з протіканням захворювання у агента;
- 3) подія «контакт», що породжується хворим агентом.

Четвертий вид подій пов'язаний зі зміною пори року і відповідними сезонними змінами параметрів моделі, він породжується кореневим об'єктом. В нотації UML кореневої об'єкт моделі і агенти є активними об'єктами.

Нажаль, багатоплановість і об'ємність виконаної роботи не дозволяють розглянути всю модель досить докладно.



Мал. 3. Структура агентної моделі поширення грипу

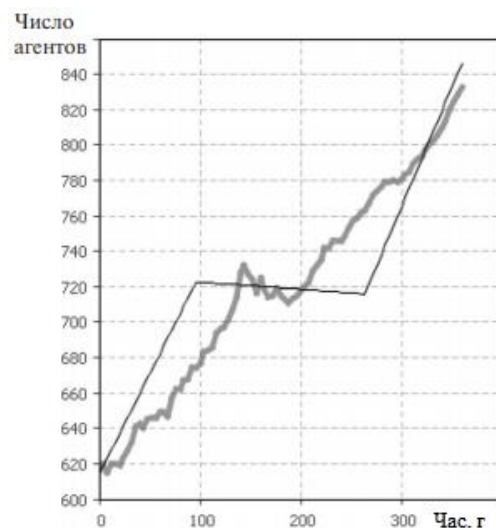
1.2.2.3 Застосування моделі поширення захворюваності грипу А

Дискретно-подієва агентна модель поширення грипу реалізована в середовищі моделювання AnyLogic 6. Були проведені її успішне тарування і перевірка коректності. Для цього використовувалася статистика захворюваності на грип та ГРВІ в Санкт-Петербурзі за останні кілька років, отримана від НДІ грипу з лабораторії епідеміології грипу (керівник І.Г. Маринич).

Розроблена модель дозволяє виконати досить точний короткостроковий прогноз розвитку сезонної епідемії грипу А. На мал. 4 представлений зовнішній вигляд одержуваного прогнозу (широка сіра лінія - результат чисельного експерименту, тонка чорна лінія - реально отримана статистика захворюваності за відповідний період часу). Модель вільна від диференціальних рівнянь, і в ній легко можуть бути враховані будь-які адміністративні заходи боротьби з захворюваністю. Модель стохастична і, хоча вона вимагає для отримання прогнозу багаторазових прогонів, може бути використана для аналізу ризиків настання певної події.

У розробленій моделі забезпечений облік найбільш ефективних заходів

зниження інфекційної захворюваності, таких як вакцинація і карантин. Крім того, зараз ведуться роботи по оцінці ймовірності отримання певного економічного збитку в результаті вжитих адміністративних заходів. В результаті цих робіт на основі агентної моделі поширення захворювань буде створена система підтримки прийняття рішень, що дозволяє не тільки отримати оперативний прогноз розвитку епідемії, а й кількісно оцінювати порівняльні переваги різних методів боротьби з нею. Розроблений підхід може бути успішно поширений і на інші види інфекційних захворювань.



Мал. 4. Приклад прогнозу, отриманого за допомогою агентної моделі поширення грипу (- число інфікованих агентів; - історичні дані)

2 Математичні моделі поширення захворювань

Велика частина моделей поширення захворювань (далі МПЗ) заснована на використанні систем алгебродиференціальних рівнянь, рішенням яких є рівень інфекційної захворюваності в кожен момент модельного часу. Найбільш відомою серед таких МПЗ є модель SIR, запропонована В.О. Кермак (W. O. Kermack) і А.Г. Мак-Кендриком (A. G. McKendrick) в 1927 р. У цій моделі, як і в інших моделях такого типу, вся популяція території, що моделюється, ділиться на групи [3]:

- «Susceptible» - здорові люди, сприйнятливі до захворювання (позначимо їх кількість S);
- «Infectious» - інфекційні хворі (позначимо їх кількість I);
- «Recovered» - перехворіли модельований захворюванням люди, більш до нього не сприйнятливі (позначимо їх кількість R).

З огляду на те, що загальне число індивідів в популяції залишається незмінним, приріст числа людей в кожній з виділених груп можна описати за допомогою системи рівнянь.

Існує безліч модифікацій моделі SIR, виконаних, в основному, для врахування особливостей того чи іншого моделіруемого захворювання. Наприклад, зазвичай вводять групу індивідів «Exposed» (модель SEIR), до якої відносяться люди з захворюванням в інкубаційному періоді. Назвемо такий підхід до побудови МПЗ класичним, традиційним. До цього ж класу МПЗ можна віднести і моделі, що використовують системи рівнянь складнішої структури. Наприклад, в широко відомій моделі О.В. Бароян і Л.А. Рвачева вирішується система нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь в частинних похідних.

З початку 20 століття в епідеміології набули широкого поширення математичні моделі, побудовані на феноменології епідемічного процесу типу SIR і різних його модифікаціях, які можна певною мірою віднести до детермінованих моделей. Починаючи з робіт О.А.Барояна, Л.А.Рвачева і

Ю.Г.Іваннікова, в практику вітчизняної епідеміології увійшли математичні моделі, побудовані на основі феноменології епідемічного процесу типу SEIRF (S - сприйнятливі, E - індивідууми, що знаходиться в інкубації, I - індивідууми з клінічними проявами інфекційної хвороби, R - видужалі, F - померлі). Сучасні математичні моделі на основі зазначеного феноменологічного підходу зазнали ряд змін математичного апарату і були адаптовані для інших видів інфекційних хвороб.

Відомо, що призначення систем математичного моделювання і прогнозування з феноменологією типу SEIRF полягає в отриманні кількісного прогнозу розвитку епідемічного процесу, що забезпечує:

- оцінку ефективності різних комплексів заходів протидії розвитку епідемічного процесу при НС в області санітарно-епідеміологічного благополуччя населення, включаючи терористичні акти із застосуванням патогенних біологічних агентів, за різними сценаріями;
- науково-обґрунтовану оперативну оцінку можливого економічного збитку при виникненні епідемії особливо небезпечних хвороб з урахуванням заходів протидії епідемічного процесу при різних початкових умовах;
- оцінку готовності медичних служб до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в області санітарно-епідеміологічного благополуччя населення, включаючи розрахунок необхідної кількості засобів індивідуального захисту, лікарських препаратів, засобів екстреної профілактики, лабораторної бази і ін.

В РосНПЧІ «Мікроб» спільно з ГУ НІЕМ ім. Н. Ф. Гамалії РАМН були розроблені математичні моделі епідемії з феноменологією епідемічного процесу типу SEnImRF, викликаній збудником чуми в умовах великого міста з урахуванням заходів протидії розвитку епідемічного процесу. Математичні моделі реалізовані в комплексі комп'ютерних програм. Спираючись на аналіз архівних і літературних даних, розроблено найбільш ймовірні сценарії розвитку епідемічного процесу в умовах великого міста. Розрахунки, проведені за цими програмами, дозволяють оперативно, спираючись на

мінімальні початкові дані, дати кількісний прогноз розвитку епідемічної ситуації, оцінку можливого економічного збитку, можливості ліквідації епідемії силами і засобами місцевої охорони здоров'я. Наприклад, розглядаючи можливість застосування збудника чуми в якості біологічного агента при терористичному акті в великому місті, можна оперативно провести розрахунки динаміки кількості хворих людей з урахуванням таких заходів протидії епідемічного процесу, як ізоляція і екстрена профілактика, а також розрахунки кількості необхідних препаратів для екстреної профілактики населення.

Математичні моделі з феноменологією епідемічного процесу типу SIR і SEIR з урахуванням просторового взаємозв'язку були використані в розробці програмного забезпечення STEM (Spatiotemporal Epidemiological Modeler) корпорацією IBM. Просторові і часові взаємозв'язки реалізовані за допомогою математичного апарату і теорії графів. З урахуванням чисельності населення на кожній з територій, географічних і макроекономічних даних, дорожніх карт, розташування аеропортів, транспортної системи, маршрутів міграції птахів програма становить графічну презентацію можливих шляхів і динаміки поширення інфекції. Основною перевагою є можливість інтеграції в розроблену IBM стандартизовану інфраструктуру Public Health Affinity Domain (PHAD).

Програма STEM розроблена IBM в рамках міжнародної ініціативи по боротьбі з виникненням епідемій на кшталт пташиного грипу, в якій беруть участь більше двадцяти організацій охорони здоров'я по всьому світу. STEM підходить для роботи з будь-якою операційною системою і побудована на відкритому вихідному коді, тому програму можна «підганяти» для роботи з поширенням різних вірусів, а результати розрахунків візуалізувати за допомогою, наприклад Google Earth.

Розвиток інформаційних технологій в останні роки, використання в наукових дослідженнях технологій розподілених обчислень, використання «суперкомп'ютерів» дозволили переглянути підходи до моделювання

епідемії. Один з таких підходів в моделюванні і прогнозуванні епідемічного процесу використовувався в епідеміологічній моделі EpiSims.

EpiSims в якості основи використовує розроблену раніше TRANSIMS - модель оцінки наслідків реорганізації транспортної інфраструктури міста Портленд штат Орегон. Аналізуючи офіційні дані, на карті виділили 180 тис. вузлових точок і склали картину повсякденного життя 1,6 млн віртуальних жителів Портленда. Це дозволило створити адекватну картину фізичних контактів між людьми у великих населених пунктах.

У створеній моделі, протягом 100 днів, було промодельовано спалах віспи за кількома сценаріями з урахуванням заходів протидії і без. Результати моделювання показали, що визначальним фактором протидії поширенню інфекції є час початку заходів. Також результати розрахунків показали, що масова вакцинація населення в даному випадку недоцільна. Набагато більш ефективна виборча вакцинація за умови ранньої реєстрації епідемії. Важливо також і введення карантину.

Щоб оцінити вартість і результативність різних заходів, автори змоделювали навмисне поширення легеневої чуми в Чикаго. Виявилось, що відстеження контактів інфікованих, припинення занять в навчальних закладах, введення в місті закритого режиму пов'язане з мільярдними збитками і дає мало переваг у порівнянні з таким відносно недорогим заходом, як масовий прийом антибіотиків.

Класичні МПЗ продовжують розвиватися і сьогодні, зокрема, в роботах Б.В. Боева. Однак для застосування математичного апарату диференціальних рівнянь в таких МПЗ передбачається, що всі індивіди однотипні і безперервно і рівномірно переміщуються по території, що моделюється. Насправді ж більшість реальних популяцій мають вкрай складну структуру, обумовлену соціальним розшаруванням, різноманітністю географічних умов і складними часовими і просторовими схемами переміщення. Крім того, класичні МПЗ є повністю детермінованими і підходять тільки для оцінки поведінки дуже великих популяцій. Природа епідемічних процесів носить

імовірнісний характер, нехтуючи випадковими чинниками, можна отримати грубі або помилкові результати моделювання.

Для подолання обмежень традиційних моделей сьогодні застосовуються дискретно-подієві моделі. Такі моделі на етапі виконання мають деяку безліч змінних стану, що характеризують модель, а також список запланованих подій, які повинні відбутися в певній послідовності в майбутньому. Кожна подія в моделі - деякий набір атомарних дій, переобумовленої значеннями змінних стану. В останні роки найбільший внесок в моделювання розповсюдження захворювань внесли так звані «популяційні» (population-based) моделі, одна з яких була розроблена А. М. Лонджінім (A. M. Longini). Це дискретно-подієві моделі, в яких відображена найпростіша структура суспільства: в популяції явно виділені індивіди різного віку, поширення захворювання між якими може статися тільки в рамках однієї «контактної» групи (contact group).

Стадії протікання захворювання в популяційних моделях зазвичай відповідають виділенням в моделі SEIR. Час в популяційних моделях рухається з фіксованим кроком дискретизації, зазвичай досить великим - в 12 або 24 години. На кожному кроці аналізується, які локації відвідував кожен індивід і за складною формулою, яка враховує різні чинники, розраховується ймовірність його зараження за минулий проміжок часу (достатнього контакту). Фіксований крок дискретизації і формула розрахунку достатнього контакту – основні джерела похибок в роботі популяційних моделей. Крім того, коефіцієнти, використовувані в цій формулі, вимагають калібрування, проведення якої може бути важко в разі необхідності врахування в моделі адміністративних заходів боротьби з захворюваністю.

Справитися з цими складнощами дозволяє агентний підхід до імітаційного моделювання. Кожен з агентів взаємодіє з іншими агентами і в процесі функціонування може змінювати свою поведінку і враховувати зміну зовнішнього середовища. Агентні МПЗ схожі на популяційні і, як правило, також дискретно-подієві. Як агенти в них розглядаються індивіди, що

формують популяцію, певним чином описується перебіг захворювання у кожного агента. На основі соціальної структури модельованої популяції формуються контактні групи, між якими переміщуються агенти і в яких може статися достатній контакт. Основна відмінність агентних МПЗ від популяційних полягає в тому, що вони децентралізовані. У агентних МПЗ крок дискретизації не фіксований, а момент часу, в який відбувається достатній контакт, визначається самим агентом. Потоки подій від всіх агентів шикуються в один загальний в хронологічному порядку і тим самим формують інтегральну динаміку модельованої системи.

В даний час не існує МПЗ, що повністю використовує переваги агентного підходу. Цікавим є створення агентної МПЗ, що дозволяє промодельовати поширення різних видів інфекційних захворювань шляхом параметричної настройки моделі

Таким чином, аналіз доступних літературних джерел показав, що в епідеміології використовуються найрізноманітніші методи математичного моделювання. Залежно від цілей можна використовувати досить прості детерміністичні або стохастичні моделі і складні імітаційні комп'ютерні. Сучасний розвиток інформаційних технологій дозволив використовувати надзвичайно складний математичний апарат для моделювання епідемічного процесу. Проте, наявні моделі або знаходяться в стадії розробки, або вимагають серйозної адаптації та доопрацювання для вирішення питань практичної епідеміології.

3 Агентні середовища

У статті «Environment mediated Multi Agent Simulation Tools –A Comparison» [4] Техаського університету в Даласі порівнюються програмні середовища для розробок агентних моделей, у тому ж числі моделей поширення захворювань. Далі надано аналіз цих середовищ.

3.1 Аналізовані середовища

За останнє десятиліття було розроблено та використано безліч інструментів MAS для різних цілей. Надалі зроблено зосередження на платформах "фреймворк та бібліотека", які дозволяють уточнювати та виконувати мультиагентне моделювання. Інструменти цієї категорії можна класифікувати на дві групи: ті, що підкреслюють агентний компонент і применшують середовище, і ті, які вважають середовище важливою складовою системи та відокремлюють її від агентів.

Обговоремо п'ять інструментів, які визнають важливість навколишнього середовища в мультиагентній системі моделювання. Це NetLogo, MASON, Ascape, RePastS та DIVA. Вибір ґрунтується на тому, що NetLogo, MASON, Ascape та RePastS вважаються одними з найбільш ефективних середовищ на ринку. Оскільки багато уваги приділяється агентам, ми зосереджуємось на оцінці інструментів з точки зору навколишнього середовища та взаємодії між агентами та навколишнім середовищем. Щоб забезпечити основу для порівняння, для кожного інструмента вказано та виконано соціальну імітаційну модель, де агенти представляють «людей», а навколишнє середовище – світ.

3.2 Короткий опис інструментів

NetLogo – це програмована платформа для моделювання моделей, пов’язаних із природними та соціальними явищами. MASON (багатоагентне моделювання мереж), був розроблений для забезпечення моделювання таких додатків, як ройова робототехніка, машинне навчання, соціальна складність. Ascape – це структура, призначена для підтримки розробки, візуалізації та дослідження агентних моделей. Ascape призначений в основному для моделювання соціальних наук. RePast (рекурсивне моделювання пористих агентів) спочатку було розроблено для підтримки програм соціальних наук. Остання версія – RePast Symphony (RePastS) може використовуватися для моделювання різноманітних програм (наприклад, моделювання мережі, GIS-програми). DIVAs (Dynamic Information Visualization of Agent systems) – це платформа, розроблена дослідницькою групою в Техаському університеті в Далласі. Вона включає в себе специфікацію та інструмент моделювання, що працює в IDE Eclipse. Дотепер DIVA використовувалась переважно для соціальних симуляцій.

3.3 Критерії порівняння

Критерії, що використовуються для оцінки цих інструментів, поділяються на чотири групи: критерії проектування, критерії специфікації моделі, критерії виконання моделі та документація. Для стислості описані не всі фактори. Кожен критерій оцінюється за допомогою дискретної шкали з чотирма оцінками або кількісної метрики, коли це можливо.

3.3.1. Критерії проектування

Ці критерії описують проектні рішення, що використовуються при розробці різних типів середовищ. Визначено три критерії оцінки проекту.

1. Структурна складність середовища.

Дизайнер може вирішити моделювати середовища, використовуючи

різні основні структури. Наприклад, середовище може бути змодельовано як графік, сітка, неперервний простір або їх комбінація. Зрозуміло, що інструмент, що пропонує просте середовище на основі сітки, обмежений щодо програм, які він може моделювати. Більш складні структури, такі як неперервний простір або гібридні структури (наприклад, поєднання графіка та неперервного простору), можуть бути використані для представлення більш складних реалістичних застосувань. Отже, наступні оцінки складності конструкції наведені нижче в Таблиці 1.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Графік	Сітка	Неперервний простір	Гібрид

Таблиця 1. Рейтинг складності структури довкілля

2. Розподіл навколишнього середовища

Цей фактор враховує як структурний розподіл, так і обробний розподіл. Середовище розподіляється структурно, якщо в будь-який момент часу жодна централізована організація не має повних знань про стан довкілля в цілому. Середовище розподіляється з точки зору обробки, якщо воно призначене для виконання в розподіленій мережі.

Інструменту, який пропонує розподілені середовища з точки зору структури та обробки, буде присвоєно високий рейтинг цього фактора, як представлено в таблиці 2.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Відсутність розподілу	Розподілена обробка	Розподілена структура	Розподілена структура та обробка

Таблиця 2. Рейтинг за розподілом навколишнього середовища

3. Зв'язок агента та середовища

Цей фактор оцінює кількість інформації про довкілля, яку повинен нести агент. З точки зору дизайну, зчеплення є небажаною особливістю.

Отже, як показано в таблиці 3, чим більше взаємозв'язок між агентом і середовищем, тим нижчий рейтинг.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Дуже високий зв'язок	Високий зв'язок	Середній зв'язок	Низький зв'язок

Таблиця 3. Рейтинг для зв'язку агент-середовище

3.3.2. Критерії специфікації моделі

Критерії, описані в цьому розділі, призначені для оцінки простоти використання інструменту специфікації. Це досягається оцінкою а) простоти визначення середовища як незалежного компонента та б) обсягу інформації про середовище, яку потрібно вказати в агенті.

1. Простота уточнення середовища

Цей критерій оцінюється з використанням трьох факторів: обсягу інформації, яку можна вказати через користувацький інтерфейс (UI), очікуваного рівня навичок програмування та зусиль, витрачених на створення базового середовища в нашому конкретному дослідженні.

Цей критерій вимірює, скільки можна вказати за допомогою інтерфейсу користувача. Якщо все середовище можна вказати за допомогою графічних функцій, таких як перетягування, майстрів (наприклад, для імпорту зображень) тощо, тоді інструмент оцінюється дуже високо. Якщо користувач може вказати деякі аспекти навколишнього середовища за допомогою інтерфейсу, а решту потрібно запрограмувати, тоді інструмент оцінюється як високий. Інструмент оцінюється як середній, якщо його інтерфейс дозволяє вказати лише кілька простих моделей, тоді як складні потрібно програмувати. Інструмент оцінюється як низький, якщо користувач не може вказати щось про навколишнє середовище за допомогою інтерфейсу користувача. Цей критерій узагальнено в Таблиці 4.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Жодна функція не може бути вказана. Просте середовище.	Можливості моделі можна вказати	Більшість функцій можна вказати за допомогою інтерфейсу.	Усі функції можна вказати за допомогою інтерфейсу

Таблиця 4. Рейтинг якості інтерфейсу користувача

2. Зазначені знання навколишнього середовища в агентах

Інструменти, які передбачають, що користувачі вказуватимуть інформацію про середовище в агентах, оцінюються низько, як представлено в таблиці 5. Цей критерій пов'язаний із критерієм зв'язку агент-середовище, обговореним у пункті 3.1. Якщо інструмент був розроблений з високим зв'язком між агентами та середовищем, потрібно вказати більше інформації про середовище в агентах.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Інформація про вузол та координати надається агентам	Існує вузол у середовищі, а розташування вузла зчитується під час виконання	Агент має лише знання про існування вузла та не знає про їх розташування в навколишньому середовищі	Не визначено в агентах

Таблиця 5. Рейтинг знань про навколишнє середовище в агентах

3.3.3. Критерії виконання моделі

Критеріями, що використовуються для оцінки виконання симуляції, є: а) якість візуалізації, б) подання моделювання та в) наскільки легко змінити властивості моделі під час виконання.

1. Якість візуалізації

Як показано в Таблиці 6, цей коефіцієнт отримує дуже високий

рейтинг, якщо інструмент забезпечує чудову візуалізацію зображень агентів та середовища.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Погана візуалізація зображення руху агента та навколишнього середовища	Погана візуалізація зображення руху агента. Добре для навколишнього середовища	Хороша візуалізація зображень руху агента та середовища	Відмінна візуалізація зображення руху агента та середовища

Таблиця 6. Рейтинг якості візуалізації

2. Вигляд симуляції

Різні погляди на моделювання є важливими для вивчення поведінки агента та його впливу на навколишнє середовище. Також дуже важливо, якщо користувачеві потрібно перевірити певного агента або певну ділянку в навколишньому середовищі. Дуже високий рейтинг дається інструментам, які пропонують 2D та 3D зображення, а також дозволяє перевіряти агентів та навколишнє середовище. У таблиці 7 детально описана шкала оцінок для моделювання.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
2D, нетороїдальний	Visual 2D, програмування для 3D, програмування для тороїдального простору	2D, огляд, програмування для 3D, тороїдальний простір	Забезпечене 2D, 3D, обертання, огляд тощо. Вибір між тороїдальним та нетороїдальним середовищем

Таблиця 7. Рейтинг для подання моделювання

3. Простота модифікації властивостей моделі

Оцінки за цим критерієм наведені в таблиці 8. Інструмент, який

пропонує можливість змінювати параметри моделі під час виконання, не зупиняючи моделювання (тобто інтерактивне моделювання), і спостерігати за ефектом такої зміни отримує дуже високий рейтинг.

Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Неможливо змінити властивості під час моделювання. Потрібно запрограмувати зміни	Не вдається змінити властивості під час моделювання. Вносити зміни та повторно запускати	Можна змінювати властивості, не зупиняючи моделювання. Потрібно повторно запустити моделювання, щоб побачити зміни	Можливість модифікувати властивості без зупинки моделювання. Зміни набувають чинності негайно

Таблиця 8. Рейтинг змін властивостей моделі

3.3.4. Документація

Документація оцінюється з точки зору якості та ефективності документації та навчальних посібників.

1. Якість документації та навчальних посібників
2. Ефективність документації та навчальних посібників

Час, витрачений на встановлення та розуміння інструменту, є хорошим показником ефективності документації та навчальних посібників. Отже, цей фактор оцінюється за метриками часу.

3.4. Оцінка інструментів

Результати зведені в таблиці 9-12.

	Складність структури	Поширення	Зчеплення
NetLogo	Низький	Дуже високий	Високий
Mason	Високий	Низький	Низький
Ascape	Середній	Низький	Низький
RePastS	Дуже високий	Середній	Низький - Середній
DIVAs	Середній	Високий	Дуже високий

Таблиця 9. Підсумок оцінки з використанням Критеріїв проектування

	Навичка програмування	Інтерфейс користувача	Знання агента про середовище
NetLogo	Високий	Високий	Високий
Mason	Низький	Низький	Низький
Ascape	Низький	Середній	Низький
RePastS	Високий	Низький	Дуже високий
DIVAs	Дуже високий	Дуже високий	Дуже високий

Таблиця 10. Короткий зміст оцінки за допомогою моделювання

	Якість візуалізації	Модифікація моделі	Вид моделювання
NetLogo	Середній - Високий	Середній - високий	Високий - дуже високий
Mason	Середній	Низький	Середній
Ascape	Середній	Низький	Низький - Середній
RePastS	Високий	Високий	Дуже високий
DIVAs	Високий	Дуже високий	Низький

Таблиця 11. Підсумок оцінки за допомогою критеріїв виконання симуляції

	Якість документації та навчальних посібників
NetLogo	Дуже високий
Mason	Дуже високий
Ascape	Середній – високий
RePastS	Високий
DIVAs	Середній

Таблиця 12. Короткий зміст оцінки з використанням критеріїв якості документації

Виходячи з цих результатів, ми робимо висновок, що якщо користувач не має досвіду програмування, найбільш переважними виборами є, очевидно, DIVAs, за якими слідують NetLogo, Ascape, RePastS та MASON відповідно. Наступним найважливішим критерієм вибору інструменту буде складність середовища. Чим більше можливостей для вибору структур навколишнього середовища, тим ширше його застосування в галузі багатоагентних моделювальних систем. RePastS був би найбільш бажаним вибором на основі структури середовища, за яким слідував MASON, а потім решта інструментів. Виходячи з критеріїв розподілу інструменту, найбільш переважним інструментом буде NetLogo, а потім DIVA та RePastS та інші два інструменти. Беручи до уваги всі обговорювані критерії, рейтинг інструментів буде відповідним: NetLogo, DIVAs, RePastS, MASON та Ascape.

4 Уточнення обраної моделі та програмного середовища

Для моделювання було обрано програмне середовище NetLogo. Воно імітує поширення інфекційного захворювання у напівзакритій популяції, але з додатковими функціями, такими як подорожі, ізоляція, карантин, щеплення та зв'язки між особами. Однак ми все ще припускаємо, що вірус не мутує, і що після одужання людина буде мати ідеальний імунітет.

Загалом, ця модель допомагає користувачам:

- 1) зрозуміти динаміку розповсюдження хвороби, що виникає, стосовно змін у заходах боротьби, подорожах та мобільності
- 2) зрозуміти, як число відтворення, R_0 , показує поріг епідемії
- 3) зрозуміти взаємозв'язок між похідними та інтегралами, представленими просто як відсотки та сукупна кількість випадків
- 4) надає можливості розширити або змінити модель, включаючи деякі властивості захворювання, які найбільше цікавлять користувачів.

Люди блукають по всьому світу випадковим чином. Є чотири групи осіб, які представлені як квадрати, так і кола, і географічно розділені синіми межами. Після контакту з інфікованою людиною він або вона мають шанс заразитися хворобою. Залежно від тенденцій, які визначає користувач, хворі люди або ізолюються вдома, ідуть до лікарні, потрапляють до карантину до лікарні з допомогою медичних службовців або просто пересуваються. Заражена особа має шанс на одужання після того, як пройде даний час на відновлення.

Наявність вірусу в популяції представлена кольорами осіб. Використовуються чотири кольори: білі особи не заражені, червоні особи інфіковані, жовті особи відновлюються, а зелені особи щеплені. Після одужання людина має постійний імунітет до вірусу. Оранжева людина

символізує медичного працівника або швидку допомогу, яка патрулює світ у пошуках хворих людей. Після контакту з інфікованою особою швидка допомога негайно доставляє інфікованих до лікарні в районі проживання.

Графік “Відсоток інфікованих та відновлених” показує швидкість зміни сукупності заражених та відновлених в популяції. Він відстежує середню кількість вторинних інфекцій та одужання за один хід.

В кінці моделювання R_0 відображає оцінку числа відтворення, відношення остаточного розміру, яке вказує, чи буде (або була, у модельному розумінні) епідемія. Це ще раз добре виходить з математичного визначення, що $R_0 = \beta * S(0) / \gamma = N * \ln(S(0) / S(t)) / (N - S(t))$, де N – загальна кількість населення, $S(0)$ - початкова кількість сприйнятливих, а $S(t)$ - загальна кількість сприйнятливих в момент часу t . У цій моделі оцінка R_0 - це кількість вторинних інфекцій, що виникають у середньостатистичної інфікованої особи протягом періоду її зараження.

Як користуватися:

Кнопка SETUP створює індивідуумів відповідно до значень параметрів, вибраних користувачем. Кожна особа має 5% шансу бути ініціалізованою як заражена. Після налаштування моделювання натисніть кнопку GO, щоб запустити модель. GO запускає симуляцію та виконує її безперервно, доки GO не буде натиснуто знову.

Кожен крок часу можна вважати годинами, хоча підходить будь-яка відповідна одиниця часу.

Далі йде короткий зміст повзунків у моделі.

Ініціалізація людей (ініціалізація варіюється від 50 до 400): Загальна кількість осіб, з яких починається моделювання.

Шанс інфікування (10-50): ймовірність передачі хвороби від однієї особи до іншої.

Шанс на відновлення (10 - 100): ймовірність одужання особи після того, як інфекція триває довше, ніж час одужання людини.

Середній час на відновлення (50 - 300): Час, необхідний людині для відновлення, в середньому. Фактичний час відновлення індивіда витягується з нормального розподілу, зосередженого навколо середнього часу на відновлення в середньому, зі стандартним відхиленням у чверть середнього часу на відновлення.

Середня тенденція до ізоляції (0 - 50): Середня тенденція людей до самоізоляції та не поширення захворювання. Після того, як інфікована людина буде визначена "ізолюваною", людина буде ізолюватись у поточному місці (сіра пляма) і залишатиметься там до повного одужання.

Середня тенденція йти до лікарні (0 - 50): Середня тенденція людей до госпіталізації, коли вони хворі. Якщо інфіковану людину визначити "відвідувачем лікарні", то вона поїде до лікарні та оздоровиться через половину часу середнього періоду відновлення, завдяки кращим лікам та відпочинку.

Початкова кількість швидких (0 - 4): Кількість медичних працівників або санітарних машин, які рухаються навмання, та примусово переміщують хворих до карантину при контакті. Працівники охорони здоров'я не застраховані від хвороби, і вони самі фізично не супроводжують пацієнта до лікарні. Вони рухаються зі швидкістю, що є в 5 разів швидшою за інших людей у світі, і не обмежені географічним регіоном.

Шанс вакцинації (0-50): ймовірність того, що людина отримає щеплення, а отже, і імунітет від вірусу.

Внутрішня мобільність (0 - 1): Це вказує на те, наскільки людина "мобільна". Зазвичай людина на кожному кроці часу рухається на відстань 1. У цій моделі людина рухатиметься на відстань, вказаній внутрішньою

мобільністю на кожному кроці часу. Таким чином, чим нижчий рівень внутрішньої мобільності, тим менший рух у людей. Люди рухаються випадковим чином за цим призначеним значенням; машини швидкої допомоги завжди рухаються в 5 разів швидше за вказане значення.

Крім того, є два перемикачі та пов'язаний повзунок:

Зв'язки? : Коли увімкнено, між людьми будуть довільно розподілятися зв'язки, і хвороба поширюватиметься вдвічі швидше до тих, з ким заражена людина пов'язана, ніж до інших. Коли вимкнено, хвороба поширюється з рівними шансами серед оточуючих зараженої людини.

Подорожі? : Коли увімкнено, людям із двох регіонів (розділених синьою межею посередині) дозволяється мігрувати та змішуватися. Коли вимкнено, люди залишаються в регіоні, в якому проживають.

Тенденції до подорожей (0 - 1): Коли Подорожі? увімкнено, цей повзунок вказує на ймовірність подорожі людини при кожному ході. Значення 1 означає 1-відсоткову ймовірність подорожі на один хід.

5 Програмна реалізація

```

globals
[
  nb-infected-previous ;; Number of infected people at the previous tick
  border               ;; The patches representing the blue border
  angle               ;; Heading for individuals
  beta-n              ;; The average number of new secondary infections per infected this
tick
  gamma               ;; The average number of new recoveries per infected this tick
  r0                  ;; The number of secondary infections that arise due to a single
infective introduced in a wholly susceptible population
]

turtles-own
[
  infected?           ;; If true, the person is infected.
  cured?              ;; If true, the person has lived through an infection. They cannot be
re-infected.
  inoculated?         ;; If true, the person has been inoculated.
  isolated?           ;; If true, the person is isolated, unable to infect anyone.
  hospitalized?        ;; If true, the person is hospitalized and will recovery in half the
average-recovery-time.

  infection-length     ;; How long the person has been infected.
  recovery-time        ;; Time (in hours) it takes before the person has a chance to recover
from the infection
  isolation-tendency   ;; Chance the person will self-quarantine during any hour being
infected.
  hospital-going-tendency ;; Chance that an infected person will go to the hospital when
infected

  continent            ;; Which continent a person lives on

  ambulance?          ;; If true, the person is an ambulance and will transport infected
people to the hospital.

  susceptible?         ;; Tracks whether the person was initially susceptible
  nb-infected          ;; Number of secondary infections caused by an infected person at the
end of the tick
  nb-recovered         ;; Number of recovered people at the end of the tick
]

;;;
;;; SETUP PROCEDURES
;;;

to setup
  clear-all
  setup-globals
  setup-people
  setup-ambulance
  reset-ticks
end

to setup-globals
  set border patches with [(pxcor = 0 and abs (pycor) >= 0) or (abs (pxcor) >= 0 and pycor =
0)]
  ask border [ set pcolor blue ]
  ask patch (- max-pxcor / 2 ) 0 [ set pcolor white ]
  ask patch (max-pxcor / 2 ) 0 [ set pcolor white ]
end

;; Create initial-people number of people.
to setup-people
  create-turtles initial-people
  [ setxy random-pxcor random-pycor
    ifelse xcor <= 0
    [ ifelse ycor <= 0 [set continent 3] [set continent 1] ]
    [ ifelse ycor <= 0 [set continent 4] [set continent 2] ]
  ]

```



```

    set cured? false
    set isolated? false
    set hospitalized? false
    set ambulance? false
    set infected? false
    set susceptible? true

    assign-tendency

    (ifelse
      continent = 1 [ set shape "square" ]
      continent = 2 [ set shape "circle" ]
      continent = 3 [ set shape "wheel" ]
      continent = 4 [ set shape "star" ]
    )

    set size 0.5

    ;; Each individual has a 5% chance of starting out infected
    if (random-float 100 < 5)
    [ set infected? true
      set susceptible? false
      set infection-length random recovery-time
    ]

    ifelse (not infected?) and (random-float 100 < inoculation-chance)
    [ set inoculated? true
      set susceptible? false ]
    [ set inoculated? false ]

    assign-color
  ]

  if links? [ make-network ]
end

to setup-ambulance
  create-turtles initial-ambulance
  [
    ifelse random 2 < 1
    [
      set continent 1
      setxy (- max-pxcor / 2) 0
    ]
    [
      set continent 2
      setxy (max-pxcor / 2) 0
    ]
  ]

  set cured? false
  set isolated? false
  set hospitalized? false
  set infected? false
  set inoculated? false
  set susceptible? false

  set ambulance? true

  set shape "person"
  set color orange
]
end

to assign-tendency ;; Turtle procedure
  set isolation-tendency random-normal average-isolation-tendency average-isolation-tendency
  / 4
  set hospital-going-tendency random-normal average-hospital-going-tendency average-
  hospital-going-tendency / 4
  set recovery-time random-normal average-recovery-time average-recovery-time / 4

```

```

;; Make sure recovery-time lies between 0 and 2x average-recovery-time
if recovery-time > average-recovery-time * 2 [ set recovery-time average-recovery-time * 2 ]
if recovery-time < 0 [ set recovery-time 0 ]

;; Similarly for isolation and hospital going tendencies
if isolation-tendency > average-isolation-tendency * 2 [ set isolation-tendency average-isolation-tendency * 2 ]
if isolation-tendency < 0 [ set isolation-tendency 0 ]

if hospital-going-tendency > average-hospital-going-tendency * 2 [ set hospital-going-tendency average-hospital-going-tendency * 2 ]
if hospital-going-tendency < 0 [ set hospital-going-tendency 0 ]
end

;; Different people are displayed in 5 different colors depending on health
;; yellow is a survivor of the infection
;; green is a successful inoculation
;; red is an infected person
;; white is neither infected, inoculated, nor cured
;; orange is an ambulance
to assign-color ;; turtle procedure

  ifelse cured?
  [ set color yellow ]
  [ ifelse inoculated?
    [ set color green ]
    [ ifelse infected?
      [ set color red ]
      [ set color white ] ] ] ]
  if ambulance?
  [ set color orange ]
end

to make-network
  ask turtles
  [
    create-links-with turtles-on neighbors
  ]
end

;;;
;;; GO PROCEDURES
;;;

to go
  if all? turtles [ not infected? ]
  [ stop ]
  ask turtles
  [ clear-count ]

  ask turtles
  [ if not isolated? and not hospitalized? and not ambulance?
    [ move ] ]

  ask turtles
  [ if infected? and not isolated? and not hospitalized?
    [ infect ] ]

  ask turtles
  [ if not isolated? and not hospitalized? and infected? and (random 100 < isolation-tendency)
    [ isolate ] ]

  ask turtles

```

```

[ if not isolated? and not hospitalized? and infected? and (random 100 < hospital-going-
tendency)
  [ hospitalize ] ]

ask turtles
[
  if ambulance?
  [
    move
    ask turtles-on neighbors
    [
      if (ambulance? = false) and (infected? = true)
      [ hospitalize ]
    ]
  ]
]

ask turtles
[ if infected?
  [ maybe-recover ]
]

ask turtles
[ if (isolated? or hospitalized?) and cured?
  [ unisolate ] ]

ask turtles
[ assign-color
  calculate-r0 ]

tick
end

to move ;; turtle procedure
  if travel?
  [
    if random 100 < (travel-tendency) and not ambulance? ;; up to 1% chance of travel
    [let r (random 3)
      (ifelse r = 0 [set xcor (- xcor)]
        r = 1 [set ycor (- ycor)]
        r = 2 [set xcor (- xcor) set ycor (- ycor)])]
    ]

  (ifelse continent = 1
    [
      (ifelse xcor > (- 0.5) ;; and on border patch
        [
          set angle random-float 180
          let new-patch patch-at-heading-and-distance angle (-1)
          if new-patch != nobody
          [
            move-to new-patch
          ]
        ]
        [
          ycor < (0.5)
          [
            set angle random-float 90
            let new-patch patch-at-heading-and-distance angle 1
            if new-patch != nobody
            [
              move-to new-patch
            ]
          ]
        ]
      )
    ]
    [ ;; if in continent 1 and not on border
      ifelse xcor < (min-pxcor + 0.5) or ycor > (max-pycor + 0.5) ;; at the edge of world
      [
        set angle random-float 180
      ]
      [
        set angle random-float 360 ;; inside world
      ]
    ]
  )

```

```

    rt angle

    ifelse ambulance?
    [
        fd intra-mobility * 5 ;; ambulances move 5 times as fast than the ppl
    ]
    [
        fd intra-mobility
    ]
  ])

]
continent = 2[
  (ifelse xcor < ( 0.5) ;; and on border patch
  [
    set angle random-float 180
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle 1
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ycor < (0.5)
  [
    set angle random-float 90
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle 1
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ]

  [ ;; if in continent 2 and not on border
  ifelse xcor > (max-pxcor + 0.5) or ycor > (max-pycor + 0.5) ;; at the edge of world
  [
    set angle random-float 180
  ]
  [
    set angle random-float 360 ;; inside world
  ]
  rt angle

  ifelse ambulance?
  [
    fd intra-mobility * 5 ;; ambulances move 5 times as fast than the ppl
  ]
  [
    fd intra-mobility
  ]
  ])

continent = 3[
  (ifelse xcor > (- 0.5) ;; and on border patch
  [
    set angle random-float 180
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle (-1)
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ycor > (-0.5)
  [
    set angle random-float 90
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle -1
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ]

  [ ;; if in continent 3 and not on border

```

```

    ifelse xcor < (min-pxcor + 0.5) or ycor < (min-pycor + 0.5) ;; at the edge of world
    [
      set angle random-float 180
    ]
    [
      set angle random-float 360 ;; inside world
    ]
    rt angle

    ifelse ambulance?
    [
      fd intra-mobility * 5 ;; ambulances move 5 times as fast than the ppl
    ]
    [
      fd intra-mobility
    ]
  })

]
continent = 4[
  (ifelse xcor < (0.5) ;; and on border patch
  [
    set angle random-float 180
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle 1
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ycor > (-0.5)
  [
    set angle random-float 90
    let new-patch patch-at-heading-and-distance angle -1
    if new-patch != nobody
    [
      move-to new-patch
    ]
  ]
  ]
  ;; if in continent 4 and not on border
  ifelse xcor > (max-pxcor + 0.5) or ycor < (min-pycor + 0.5) ;; at the edge of world
  [
    set angle random-float 180
  ]
  [
    set angle random-float 360 ;; inside world
  ]
  rt angle

  ifelse ambulance?
  [
    fd intra-mobility * 5 ;; ambulances move 5 times as fast than the ppl
  ]
  [
    fd intra-mobility
  ]
  })

])
end

to clear-count
  set nb-infected 0
  set nb-recovered 0
end

to maybe-recover
  set infection-length infection-length + 1

  ;; If people have been infected for more than the recovery-time
  ;; then there is a chance for recovery

```

```

    ifelse not hospitalized?
    [
      if infection-length > recovery-time
      [
        if random-float 100 < recovery-chance
        [
          set infected? false
          set cured? true
          set nb-recovered (nb-recovered + 1)
        ]
      ]
    ]
  ]
  ;; If hospitalized, recover in a fifth of the recovery time
  if infection-length > (recovery-time / 5)
  [
    set infected? false
    set cured? true
    set nb-recovered (nb-recovered + 1 )
  ]
end

;; To better show that isolation has occurred, the patch below the person turns gray
to isolate ;; turtle procedure
  set isolated? true
  move-to patch-here ;; move to center of patch
  ask (patch-at 0 0) [ set pcolor gray - 3 ]
end

;; After unisolating, patch turns back to normal color
to unisolate ;; turtle procedure
  set isolated? false
  set hospitalized? false

  ask (patch-at 0 0) [ set pcolor black ]

  ask border [ set pcolor blue ] ;; patches on the border stay blue
  ask (patch (- max-pxcor / 2) 0) [ set pcolor white ] ;; hospital patch on the left stays
white
  ask (patch (max-pxcor / 2) 0) [ set pcolor white ] ;; hospital patch on the right stays
white
end

;; To hospitalize, move to hospital patch in the continent of current residence
to hospitalize ;; turtle procedure
  set hospitalized? true
  set pcolor black
  ifelse (continent = 1 or continent = 3)
  [
    move-to patch (- max-pxcor / 2) 0
  ]
  [
    move-to patch (max-pxcor / 2) 0
  ]
  set pcolor white
end

;; Infected individuals who are not isolated or hospitalized have a chance of transmitting
their disease to their susceptible neighbors.
;; If the neighbor is linked, then the chance of disease transmission doubles.

to infect ;; turtle procedure

  let caller self

  let nearby-uninfected (turtles-on neighbors)
  with [ not infected? and not cured? and not inoculated? ]
  if nearby-uninfected != nobody
  [
    ask nearby-uninfected

```

```

    [
      ifelse link-neighbor? caller
      [
        if random 100 < infection-chance * 2 ;; twice as likely to infect a linked
person
        [
          set infected? true
          set nb-infected (nb-infected + 1)
        ]
      ]
      [
        if random 100 < infection-chance
        [
          set infected? true
          set nb-infected (nb-infected + 1)
        ]
      ]
    ]
  ]

end

to calculate-r0

  let new-infected sum [ nb-infected ] of turtles
  let new-recovered sum [ nb-recovered ] of turtles
  set nb-infected-previous (count turtles with [ infected? ] + new-recovered - new-infected)
  ;; Number of infected people at the previous tick
  let susceptible-t (initial-people - (count turtles with [ infected? ]) - (count turtles
with [ cured? ])) ;; Number of susceptibles now
  let s0 count turtles with [ susceptible? ] ;; Initial number of susceptibles

  ifelse nb-infected-previous < 10
  [ set beta-n 0 ]
  [
    set beta-n (new-infected / nb-infected-previous) ;; This is the average number of new
secondary infections per infected this tick
  ]

  ifelse nb-infected-previous < 5
  [ set gamma 0 ]
  [
    set gamma (new-recovered / nb-infected-previous) ;; This is the average number of new
recoveries per infected this tick
  ]

  if ((initial-people - susceptible-t) != 0 and (susceptible-t != 0)) ;; Prevent from
dividing by 0
  [
    ;; This is derived from integrating dI / dS = (beta*SI - gamma*I) / (-beta*SI)
    ;; Assuming one infected individual introduced in the beginning, and hence counting I(0) as
negligible,
    ;; we get the relation
    ;;  $N - \gamma \ln(S(0)) / \beta = S(t) - \gamma \ln(S(t)) / \beta$ , where N is the initial
'susceptible' population.
    ;; Since  $N \gg 1$ 
    ;; Using this, we have  $R_0 = \beta * N / \gamma = N * \ln(S(0)/S(t)) / (N - S(t))$ 
    set r0 (ln (s0 / susceptible-t) / (initial-people - susceptible-t))
    set r0 r0 * s0 ]
end

```

ВИСНОВКИ

У більшості випадків перспектива здоров'я є провідною точкою зору при прийнятті урядових рішень. Однак в моделях, використовуваних епідеміологами, відсутня частина людської поведінки. Отже, вони повинні перетворювати урядове втручання і очікувану реакцію громадян на події параметрів моделі епідемії, не маючи можливості перевіряти взаємозалежності.

Порівнюючи варіанти політики (наприклад, уряд субсидує людей чи ні в економічному сценарії), стає ясно, які наслідки і які фундаментальні вибори необхідно зробити. Така позиція дозволяє уникнути того, щоб політики могли просто звинуватити модель. Технології не повинні давати єдині рішення особам, які приймають рішення, але повинні допомагати особам, які приймають рішення, мати гарне уявлення про наслідки своїх рішень і про те, які фундаментальні пріоритети необхідно зважувати. Наприклад: радість життя літніх людей проти ризиків зустрічі з сім'єю і зараження; ризик зараження через школи проти соціальних потрясіннь, коли школи закриваються.

Завдяки агентному характеру також можна пояснити, звідки беруться результати. Наприклад, закриття шкіл може не надати позитивного впливу на поширення вірусу через всілякі побічні ефекти. Відстеження поведінки допомагає пояснити, що є основною його причиною і де в ланцюжку щось можна зробити, якщо хтось хоче уникнути такої поведінки. Кожен з кроків в цих причинних ланцюжках заснований на твердій теорії (в нашому випадку соціально-психологічній, економічній або епідеміологічній). Таким чином, можна перевірити як на правдоподібність, так і на теоретичне обґрунтування.

Використання агентних моделей спрощує налаштування параметрів в моделюванні з урахуванням відмінностей в аспектах різних країн, а також різних регіонів або навіть районів великих міст. Таким чином, можна провести більш детальний аналіз впливу державного втручання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Epidemic and intervention modelling – a scientific rationale for policy decisions? Lessons from the 2009 influenza pandemic / Марія Д Ван Керхове та Ніл М Фергюсон; Бюлетень Всесвітньої організації охорони здоров'я – Випуск 90, No. 4; квітень 2012 – сторінки 245-320;
2. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки / Кондратьев М.А., Іванівський Р.І., Цибалова Л.М.; 2010 – стр.189-195;
3. Современное состояние проблемы математического моделирования и прогнозирования эпидемического процесса / А.А.Лопатин, В.А.Сафронов, А.С.Раздорский, Е.В.Куклев – 2010 – сторінки 28-30 (Журнал: Проблемы особо опасных инфекций);
4. Environment mediated Multi Agent Simulation Tools –A Comparison: S. Arunachalam, R. Zalila-Wenkstern, R. Steiner – The University of Texas at Dallas – October 2008;
5. S. Arunachalam, Environment Mediated Multi Agent Tools – A Comparison, Masters Thesis, University of Texas at Dallas, Fall 2008.

ДОДАТКИ