

МОДЕЛЮВАННЯ ЕПІДЕМІЇ COVID-19 ТА ЇЇ СОЦІАЛЬНИХ НАСЛІДКІВ

У статті розглянуто різні моделі, що симулюють процес поширення епідемії. Наголошено, що пандемія породжує соціально-економічні проблеми, дослідження яких виходить за межі епідеміологічних моделей. У статті розкрито особливості агентного моделювання, яке дає змогу досліджувати різні сценарії розвитку подій, а також експериментувати з параметрами моделі, що дає можливість аналізувати різні політики втручання та оцінювати їх доцільність.

Ключові слова: COVID-19, моделювання, агентно-орієнтовані моделі, політика втручання.

Епідемія COVID-19 стрімко вийшла за межі епідеміологічних проблем. Тією чи іншою мірою вона торкнулася більшості соціальних інститутів, поставивши їх перед необхідністю адаптуватися до непередбачуваних обставин. Ухвалення рішень в умовах невизначеності, взаємозалежність проблем (локдаун чи економічна криза, соціальна ізоляція чи психічне здоров'я, дистанційна освіта чи соціалізація, авторитарні заходи чи демократичні свободи і т. д.), каскадні та мережеві ефекти, вплив поведінкових установок і соціальних норм на рішення, що ухвалюються, – все це свідчить про те, що рівень складності рішень, адекватних обставинам, є надзвичайно високим.

Спроби передбачити розвиток епідемії зумовили появу численних моделей, висновки яких часто суперечливі і не дають однозначної відповіді про те, як розвиватимуться події. Ще на самому початку поширення епідемії в Європі модель англійського математика Ніла Фергюсона прогнозувала, що без соціальної ізоляції пік смертності припаде на червень 2020 року і досягне катастрофічних показників: 510 тис. людей у Великій Британії і понад 2 млн людей у США (Ferguson et al., 2020). Згідно з моделлю Університету Джона Гопкінса, у червні 2020 року в США щодня від коронавірусу вмиратиме до 3 тис. людей, а відповідно до моделі Ради економічних консультантів при президентові США, навпаки, до середини травня відбудеться падіння смертності до нуля (Page, 2020). За розрахунками вчених Світового центру даних «Геоінформатика і сталий розвиток» на базі Київської політехніки, пік захворюваності в Україні за відсутності жорстких карантинних заходів мав припасти на середину квітня 2020 року. При цьому кількість хворих становитиме понад 60 тисяч, а смертність може

досягти понад 4500 осіб¹. Водночас учені з Сінгапурського університету технологій та дизайну прогнозували завершення епідемії коронавірусу в Україні до червня 2020 року².

Різноманітність моделей і висновків, які ми спостерігаємо, пов'язана не так із недосконалістю наявних інструментів моделювання, як зі складністю об'єкта, що моделюється. Будь-яка модель є спрощенням реальності, тому про адекватність її висновків можна судити тільки в межах припущень, зроблених під час її побудови. Як стверджує професор Мічиганського університету Скотт Пейдж, потрібно використовувати багато моделей. Це дає змогу уникнути вузькості, притаманної кожній окремій моделі (Page, 2018). Різні моделі відображають різні аспекти складної реальності. Статистичні моделі дають змогу виявити важливі середні показники (наприклад, число R_0 , що показує, скількох людей у середньому інфікує хворий). Математичні моделі описують процеси, а агентне моделювання акцентує на поведінці людей. Агентні моделі – це комп'ютерні моделі (*computational modelling*), які на підставі комп'ютерної симуляції агентів на індивідуальному рівні досліджують поведінку системи в цілому.

Ще однією важливою особливістю моделювання епідемії COVID-19 є невизначеність щодо ключових параметрів і процесів, які описують хворобу. У цій ситуації, як зазначає низка дослідників, слід брати до уваги глибоку невизначеність, що оточує пандемію, і не ставити завдання побудови не тільки точних прогнозів (Коли

¹ Пік захворюваності COVID-19 в Україні очікується з 14 по 22-23 апреля. <https://kpi.ua/ru/node/18005>

² Коли закінчиться епідемія коронавірусу в Україні: прогноз учених. *Сьогодні*. 28 квітня 2020. <https://www.segodnya.ua/lifestyle/wellness/kogda-zakonchitsya-epidemiya-koronavirusa-v-ukraine-prognoz-uchenyh-1436382.html>

закінчиться пандемія?), але й імовірнісних прогнозів (Яка ймовірність спалаху?). Замість цього пропонується використовувати широкі діапазони невизначеності для невідомих параметрів задля створення великого набору можливих варіантів майбутнього, без будь-яких предикативних або ймовірнісних показників (Steinmann et al., 2020).

Використання результатів моделювання для розроблення політичних рішень також зіткнулося з низкою проблем. Однією з них є те, що гарні моделі пандемії COVID-19 не завжди є хорошими моделями політичних рекомендацій (Squazzoni et al., 2020). Наприклад, ідеальна стратегія запобігання новим інфекціям (суворий карантин) може мати вкрай несприятливі соціально-економічні наслідки. Крім того, взаємодія політиків і вчених ускладнюється різними уявленнями про те, що є результатом моделювання. З погляду політика, рекомендація має бути конкретною, короткою, безпосередньо стосуватися політичних проблем і супроводжуватися правдоподібним описом. З погляду фахівця в галузі моделювання, рекомендація має враховувати внутрішню невизначеність висновків, зроблених на основі моделі, і уникати надмірного спрощення. Розбіжність поглядів учених і політиків призводить до того, що хороші моделі залишаються незатребуваними, а під тиском необхідності швидкого реагування виникає спокуса звернутися до простих моделей з високими прогнозними вимогами і чіткими рекомендаціями для політиків (Squazzoni et al., 2020). З метою узгодження наукових і політичних процесів перед складністю і невизначеністю було видано маніфест «A Manifesto for Democratically Accountable Modelling», який закликає до відкритості та підзвітності щоразу, коли складну модель використовують для ухвалення рішень, що впливають на життя людей³.

З одного боку, світовий досвід моделювання дає змогу говорити про значні результати в цій галузі. Швидкими темпами вже кілька десятиліть розвиваються різні напрями моделювання, серед яких статистичне, комп'ютерне, біологічне, соціальне моделювання, моделювання складних систем і т. д. З іншого боку, є розуміння того, що пандемія захопила фахівців у галузі моделювання зненацька і потрібно підготуватися до можливих майбутніх пандемій (Curtie et al., 2020).

Базова модель поширення епідемії

Базовою моделлю поширення епідемії є SIR-модель (рис. 1), в якій популяція розділена на 3 групи (*compartments*), а саме: сприйнятливі

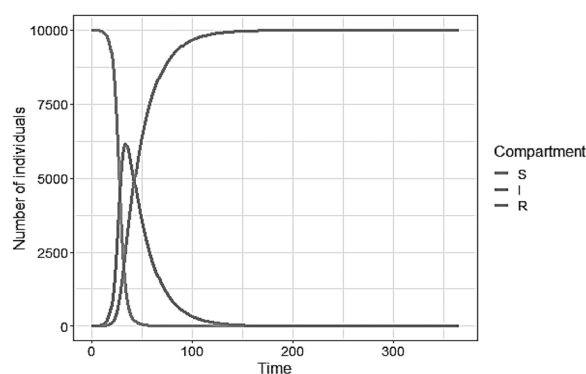


Рис. 1. Базова модель поширення епідемії (SIR-модель)

(*S* – *Susceptible*), інфіковані (*I* – *Infected*) і ті, кого заразити не можна (*R* – *Recovered*). Це вид моделювання «згори вниз». В основі цієї моделі лежить система диференціальних рівнянь, що описують динаміку трьох зазначених складових. Модель показала, що поширення епідемії (зміна кількості інфікованих) проходить кілька етапів. Спершу практично непомітне зростання, потім стрімкий експонентний зліт, вихід на плато і, нарешті, не менш стрімкий спад. Крім того, модель вказує на репродуктивне число R_0 (середня кількість людей, яких може заразити інфікована людина), яке визначає, чи буде спалах поширюватися ($R_0 > 1$), чи згасне ($R_0 < 1$). Отже, заходи щодо стримування епідемії (фізичне дистанціювання, носіння масок, тестування та ін.) спрямовані на зменшення ймовірності передачі хвороби, а значить, і на зниження числа R_0 .

Компартментні моделі (варіанти моделі SIR) часто використовують для інформування політиків про динаміку поширення епідемії. Прикладом є модель Ніла Фергюсона (рис. 2), що показує можливості згладжування кривої в разі ухвалення певних рішень.

Перевагою цієї моделі є те, що вона описує великомасштабну поведінку, динаміку макрорівня. Недоліком є те, що вона не враховує топології соціальних взаємодій і не дає змоги описати в деталях динаміку епідемії. Джанлука Манц пояснює цю проблему за допомогою метафори: «Це якби ми реалістично намагалися змоделювати автомобільні потоки на рівні країни і потенційно пов'язані з ними затори, не моделюючи мережі вулиць, маршрутів і автострад. Чи може цей тип моделей виходити за межі рекомендацій, які радять усім не користуватись автомобілем або дозволяють тільки певній частині населення рухатися по маршруту в певний час і в певні дні? Маю підозру, що не може. Можна також очікувати, що багато хто з водіїв буде вкрай

³ <https://damcampaign.org/manifesto/>

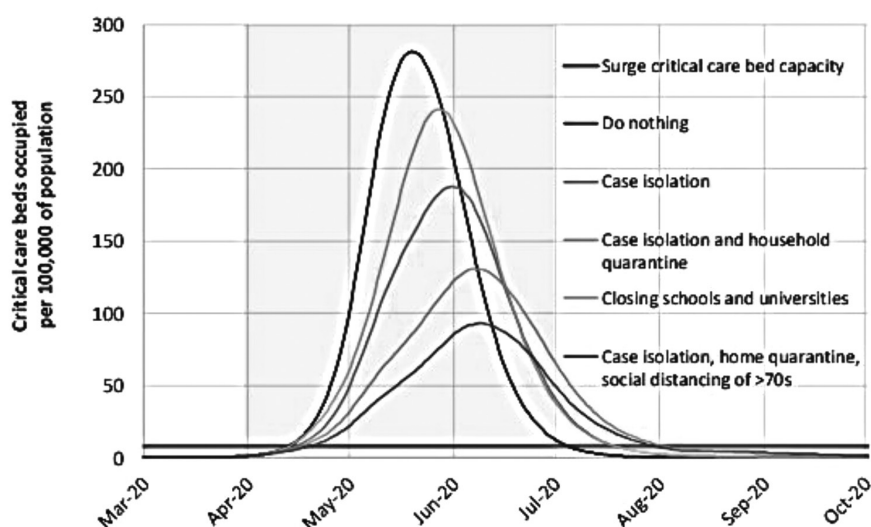


Рис. 2. Сценарії пом'якшення наслідків епідемії COVID-19 на основі моделі Ніла Фергюсона. Горизонтальна пряма – можливості системи охорони здоров'я Великої Британії (кількість ліжко-місць на 100 000 населення). Сценарії: відсутність заходів щодо пом'якшення наслідків (верхня крива); закриття шкіл та університетів; ізоляція; ізоляція і домашній карантин; ізоляція, домашній карантин і соціальне дистанцювання осіб за 70 років (найнижча крива).

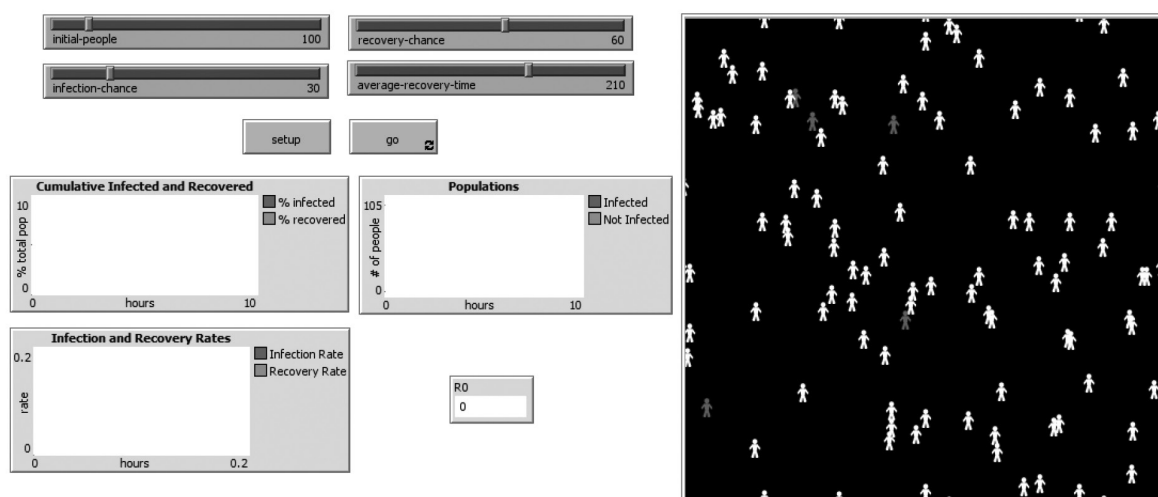


Рис. 3. Скриншот моделі epiDEM у середовищі моделювання NetLogo 6.0.2

незадоволений такими загальними і недиференційованими інструкціями. Моделі SIR, що використовуються сьогодні, ставлять кожного з нас в аналогічну ситуацію» (Manzo, 2020, p. 42).

Агентно-орієнтовані моделі поширення коронавірусу

Недолік компартментних моделей намагається компенсувати агентне моделювання: в штучному просторі відтворюється взаємодія агентів, що мають різні характеристики та діють за різними правилами. Цей вид моделювання «знизу вгору» є більш чутливим до деталей і дає змогу отримати різні сценарії розвитку подій, розширюючи наші

уявлення про те, що може відбутися в майбутньому і за яких умов. На важливість використання агентно-орієнтованих моделей для прогнозування поширення епідемії свого часу вказував професор епідеміології Коледжу глобальної суспільної охорони здоров'я Нью-Йоркського університету Джошуа М. Епштейн, підкреслюючи здатність цих моделей враховувати ірраціональну поведінку людей, складні соціальні мережі взаємодій, виявляти порогові значення параметрів, а також бачити великомасштабну поведінку (Epstein, 2009).

Однією з найпростіших агентних моделей є модель epiDEM⁴, побудована в середовищі моделювання NetLogo (рис. 3). Люди хаотично

⁴ NetLogo Models Library: Curricular Models/epiDEM

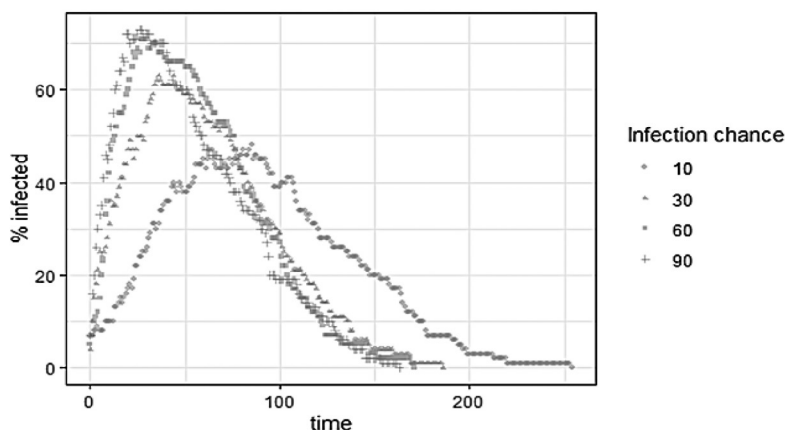


Рис. 4. Криві поширення епідемії за різних значень імовірності передачі вірусу

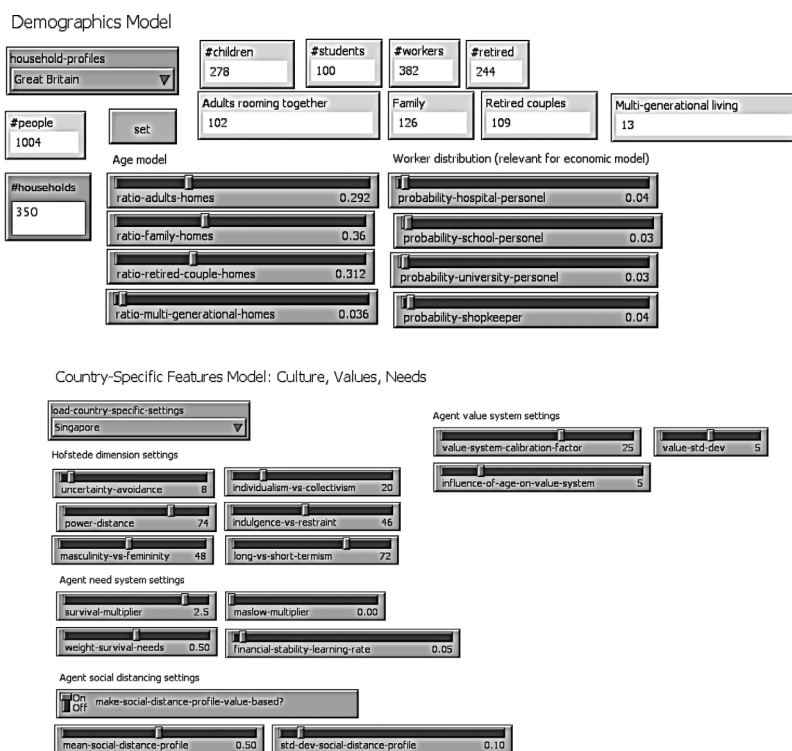


Рис. 5. Скриншот моделі ASSOCC: деякі слайдери моделі

пересуваються в комп’ютерному просторі. Зустрічаючись з інфікованою людиною, заражаються з певною ймовірністю.

Перевагою агентного моделювання є можливість експериментувати з параметрами моделі. На рис. 4 показано криві поширення епідемії за різних значень імовірності передачі вірусу. Поведінка людей, що сприяє зниженню шансу передачі хвороби (соціальна дистанція, носіння масок, дезінфекція тощо), істотно згладжує криву поширення епідемії.

Інтерес до агентного моделювання пов’язаний ще й з тим, що динаміка поширення коронавірусу

дуже відрізняється в різних країнах. Кількість параметрів, які впливають або можуть впливати на траєкторію поширення хвороби, доволі велика. Серед численних агентних моделей, запропонованих з моменту початку епідемії, варто виділити створену в NetLogo модель ASSOCC (Agent-based Social Simulation for the COVID-19 Crisis) ⁵.

На відміну від компартментних моделей, популяція не є однорідною. Агенти мають різні характеристики і використовують різні моделі

⁵ ASSOCC – Agent-based Social Simulation of the Coronavirus Crisis. <https://simassocc.org/>

Таблиця. Параметри моделі ASSOCC поширення епідемії

Параметр	Німеччина	Італія	Південна Корея	Сінгапур
Adult rooming together	0,291	0,309	0,352	0,586
Retired Couples	0,234	0,298	0,431	0,191
Family	0,457	0,344	0,163	0,128
Multi Generational	0,018	0,049	0,054	0,095
Power distance	35	50	60	74
Individualism vs. Collectivism	67	76	18	20
Masculinity vs. Femininity	66	70	39	48
Uncertainty avoidance	65	75	85	8
Long-term orientation vs. short-term orientation	83	61	100	72
Indulgence vs. Restraint	40	30	29	46

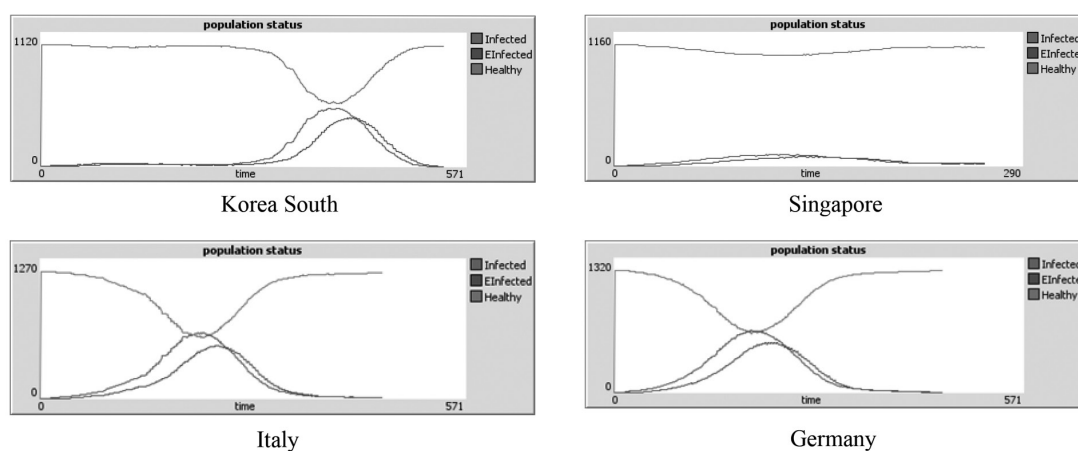


Рис. 6. Сценарії розвитку епідемії в різних країнах

поведінки. Агенти переміщуються в комп'ютерному просторі відповідно до своїх потреб (будинки, школи, університети, магазини, місця роботи, вокзали, аеропорти, лікарні). Агенти відрізняються за ступенем сприйняття ризику, схильності дотримуватися закону, за потребами, рівнем добробуту. Крім того, враховується і те, що країни мають не тільки різні демографічні характеристики (чисельність і щільність населення, гендерна та вікова структура), але й різні конфігурації домогосподарств (розмір сім'ї, кількість людей, які проживають спільно, вікова структура). У моделі також враховано різні поведінкові установки людей на основі теорії індивідуальних потреб Маслоу, теорії цінностей Шварца і типології культурних вимірів Гофстеде (Hofstede et al., 2010). Ці параметри можна налаштовувати за допомогою слайдерів моделі (рис. 5).

Моделювання демонструє різні сценарії поширення епідемії в різних країнах. Для прикладу розглянемо такі країни, як Німеччина, Італія, Південна Корея та Сінгапур. Параметри

моделі, що характеризують конфігурацію домогосподарств⁶ і ступінь уподобань певних цінностей у цих країнах, наведено в таблиці. З розглянутих країн у Сінгапурі найбільший відсоток дорослих, які проживають разом, тоді як у Німеччині – найменший. Південна Корея відрізняється більш високим відсотком пар пенсійного віку. А в Німеччині найбільше сімейних пар. У Південній Кореї та Сінгапурі переважають цінності колективної культури, високий рівень дистанції влади, фемінність. При цьому Південна Корея має найвищий рівень уникнення невизначеності.

Результати моделювання (рис. 6) показують, що поширення коронавірусу в Південній Кореї та Сінгапурі характеризується менш різким зростанням захворювання, більш низьким піком кількості інфікованих і можливістю швидкого придушення спалаху.

⁶ 2017 UN report on household size and composition. https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/household_size_and_composition_around_the_world_2017_data_booklet.pdf

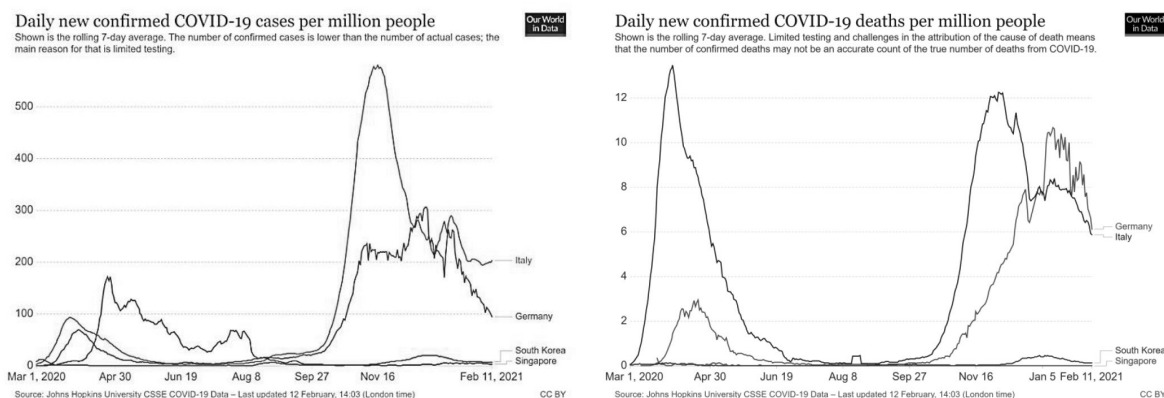


Рис. 7. Кількість підтверджених випадків і смертей на 1 млн осіб у Німеччині, Італії, Південній Корей та Сінгапурі. Наведено згладжені криві методом ковзного 7-денного середнього

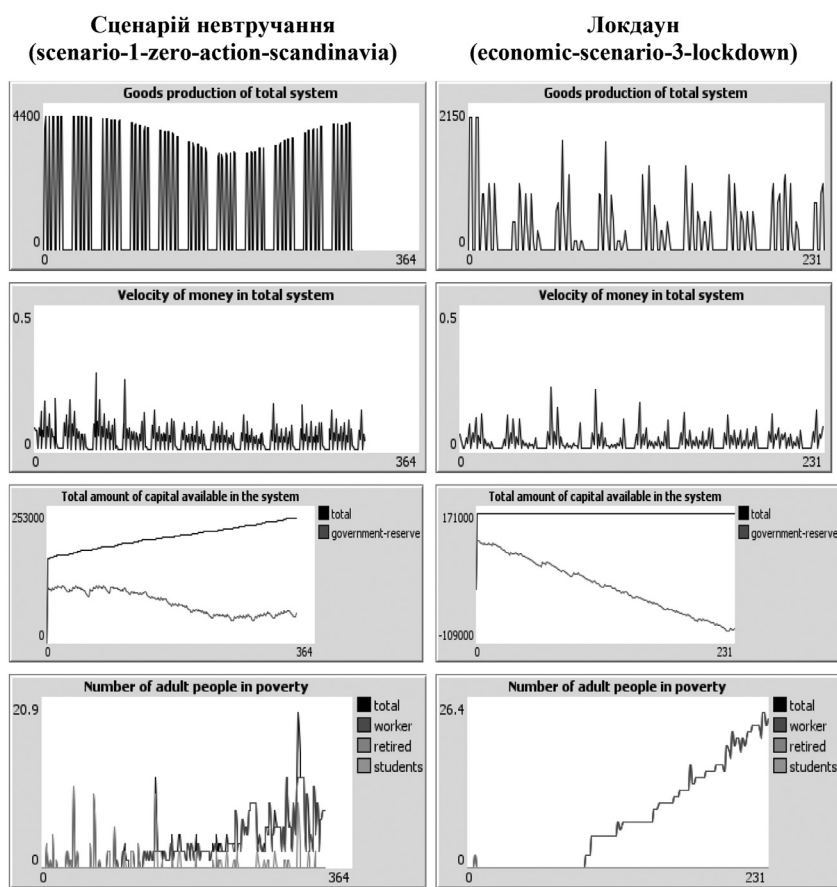


Рис. 8. Порівняльна динаміка економічних показників (виробництво товарів, швидкість обігу грошей, наявний в економіці капітал, кількість дорослого населення, що перебуває на межі бідності) в період пандемії за двох сценаріїв: невтручання і локдауну

Реальна динаміка захворюваності і смертності населення теж продемонструвала значну відмінність Південної Корей та Сінгапуру від Німеччини та Італії щодо розповсюдження COVID-19 (рис. 7) ⁷.

Можливо, ще більш важливою перевагою агентного моделювання є можливість комп'ютерного експериментування, що сприяє кращому

розумінню економічних наслідків втручання в процес поширення епідемії.

Розглянемо два крайніх сценарії: 1) сценарій невтручання, який не припускає будь-яких заходів щодо стримування епідемії, і 2) повний локдаун. Як видно з рис. 8, економічні показники (виробництво товарів, швидкість обігу грошей, державні резерви) в разі введення локдауну

⁷ <https://ourworldindata.org/coronavirus>

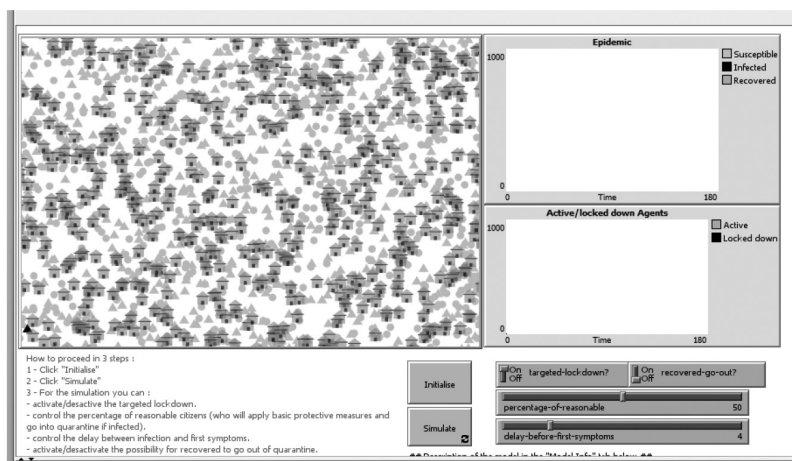


Рис. 9. NetLogo скриншот моделі поширення епідемії в разі політики цільового стримування

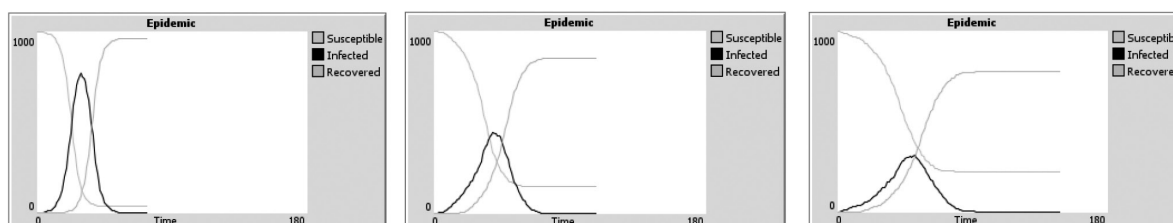


Рис. 10. Криві поширення епідемії для значень параметра *percentage-of-reasonable* 50 %, 80 %, 85 % (зліва направо)

значно погіршуються. Стрімко зростає кількість тих, хто опиняється за межею бідності. Країни постали перед важким вибором: високі темпи поширення епідемії чи економічний спад. Однак, окрім цих двох крайніх сценаріїв, є відносно великий набір заходів щодо стримування епідемії (закриття шкіл, скасування масових заходів, соціальне дистанціювання і т. д.). Утім, ефективність втручання залежить від багатьох чинників, взаємодія яких може мати несподіваний результат. У цій ситуації агентне моделювання може стати інструментом ухвалення рішень (Gaudou, 2020).

Використання агентних моделей для соціального навчання

Моделювання може відігравати ще одну важливу роль, на яку вказував професор Брюс Едмондс, а саме соціальне навчання (Edmonds et al., 2019). Залучення звичайних людей у процес комп'ютерної симуляції сприяє кращій соціальній обізнаності і стимулює більш відповідальну поведінку. Саме таке завдання поставила перед собою міждисциплінарна група французьких дослідників, які в березні 2020 року на добровільних засадах створили на сайті CoVprehension проект «Understanding The Current Covid-19 Epidemic: One Question, One Model». Сутність

цього проекту полягає в тому, щоб зібрати питання, які під час епідемії найбільше хвилюють людей, і надати моделі для експериментування. Серед питань, запропонованих для симуляції, такі: «Як найкраще використовувати доступні тести?», «Які обмеження ми можемо застосовувати для управління епідемією?», «Що таке колективний імунітет?», «Що змінить збільшення фізичної відстані між людьми?», «Чи може пошук контактів за допомогою мобільного додатка змінити ситуацію?».

Розглянемо модель, побудовану для відповіді на питання «Деякі країни, наприклад Швеція, вибрали не локдаун, а цільове стримування. Чи можливо зупинити епідемію таким чином?»⁸.

На початку симуляції присутній «нульовий агент», який є інфікованим. У моделі присутні ще й «розумні агенти» – це агенти, які користуються заходами захисту та йдуть на карантин за перших ознак хвороби. Правило передачі вірусу: на кожному часовому кроці агент А випадковим чином взаємодіє з агентом В, що перебуває поруч. Якщо А і В вже інфіковані або обидва неінфіковані, то нічого не відбувається. Якщо В інфікований, а А – ні, то А заражається з ймовірністю 20 %. Ця ймовірність змінюється, якщо

⁸ <https://covprehension.org/en/2020/04/08/q13.html>

агенти розумні: якщо розумним є тільки один агент, то ймовірність ділиться на 2, а якщо обидва, то ймовірність ділиться на 4.

На рис. 9 наведено скриншот екрана моделі, де слайдери дають змогу встановлювати різні значення параметрів *percentage-of-reasonable* (відсоток «розумних агентів») і *delay-before-first-symptoms* (інкубаційний період), тим самим дозволяючи експериментувати з моделлю. На рис. 10 наведено графіки поширення епідемії для значень параметра *percentage-of-reasonable* 50 %, 80 % та 85 %. Як видно з рисунків, якщо розумних агентів у популяції не більше половини, то динаміка поширення хвороби практично не відрізняється від ситуації, коли не застосовується жоден із заходів щодо стримування епідемії. Істотне згладжування кривої епідемії спостерігається, коли кількість розумних агентів стає більшою за 80 %.

Ще одним важливим аспектом, що впливає на динаміку поширення хвороби, є інкубаційний період. «Розумні агенти» не завжди можуть розпізнати хворобу, особливо якщо вона має безсимптомний перебіг. Більше того, сам інкубаційний період доволі розпливчастий: від декількох днів до 2–3 тижнів. Вплив параметра *delay-before-first-symptoms* показано на рис. 11.

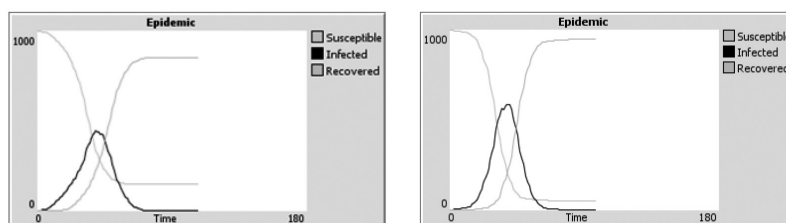


Рис. 11. Динаміка поширення епідемії для різних інкубаційних періодів: ліворуч (*percentage-of-reasonable* = 80 %, *delay-before-first-symptoms* = 4); праворуч (*percentage-of-reasonable* = 80 %, *delay-before-first-symptoms* = 14)

Використання моделей для соціального навчання дає змогу зменшити вплив необґрунтованих тверджень і чуток, які не завжди адекватні ситуації, що склалася, а також поширювати моделі поведінки, що сприяють зменшенню ймовірності поширення хвороби.

Висновки

Пандемія COVID-19 зумовила інтерес до моделювання. У світі за минулий рік з'явилася величезна кількість різних моделей, які часто дають різні прогнози і рекомендації. Проблеми, з якими стикаються дослідники, значною мірою пов'язані зі складністю соціально-економічної дійсності. Різні моделі намагаються акцентувати

різні аспекти соціальної складності. Зокрема, епідеміологічні моделі добре підходять для прогнозування нових випадків, оцінювання ефективності вжитих заходів щодо згладжування зростання епідемії. Проте ці моделі не підходять для розроблення стратегічних рішень, для оцінювання соціально-економічних наслідків ужитих заходів. Вони не можуть підказати, як невеликі зміни в поведінці і взаємодії людей можуть вплинути на результати на рівні популяції. Інакше кажучи, для різних рішень потрібні різні моделі. Вони не замінюють, а доповнюють одна одну.

Як стверджують дослідники, на сьогодні бракує розробників моделей (Currie et al., p. 94). Для відповідей на питання, пов'язані з епідемією та її наслідками в майбутньому, пропонується поряд з репозиторієм даних створювати репозиторій моделей (Currie et al., p. 93) для швидкого доступу академічної спільноти до наявних моделей та об'єднання зусиль різних дослідників.

Крім того, з огляду на те, що на основі результатів моделювання ухвалюються рішення, здатні вплинути на життя людей, наукове співтовариство вказує на необхідність підвищити

прозорість, доступність і точність моделей. Як слушно зауважує професор Брюс Едмондс, хороше моделювання потребує «багато часу і багато очей». На думку вченого, бажання допомогти в кризовій ситуації природне, але важливо робити щось справді корисне, а не просто «посилувати шум».

Не менш важливим питанням залишається затребуваність моделей для політиків. На думку професора Фламініо Скуазоні, залучення політиків на ранніх етапах моделювання (тобто «спільне проектування») дасть розробникам моделей розуміння контексту розроблення політики, а політикам – розуміння невизначеностей і припущень, неминучих під час моделювання (Squazzoni et al., 2020).

З огляду на те, що поведінка людей, характер їхньої взаємодії істотно впливають на сценарій розвитку епідемії, популяризація ідей моделювання, залучення звичайних людей в обговорення і симуляцію комп'ютерних моделей могли б сприяти зростанню соціальної обізнаності та відповідальності. Проблеми довіри до дій уряду зі стримування епідемії, участі населення у вакцинації, виконання людьми запобіжних протиепідемічних заходів – це завдання, без розв'язання яких будь-яка протиепідемічна політика не буде ефективною. Агентне моделювання могло б не тільки підказати, як знизити ризики в період епідемії, але й змодельовати, як може змінитися поведінка людей після епідемії, що не менш важливо для соціально-економічного розвитку країни в майбутньому.

В Україні поширення епідемії досліджується на основі компартментних моделей (наприклад, модель Інституту проблем математичних машин і систем НАН України⁹, модель Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова¹⁰, модель Київської

⁹ <http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=7356>

¹⁰ <http://incyb.kiev.ua/archives/4444/zastosuvannja-metodologii-podobnosti-dlja-prognozuvannja-covid-19/>

школи економіки¹¹). При цьому наявна проблема своєчасності і точності даних, які закладаються в модель. На жаль, практично немає агентно-орієнтованих моделей, які могли б допомогти в розробленні більш послідовної та ефективної політики і знизити витрати в економічній сфері. Звуження різноманіття моделей, обмежена комунікація між творцями моделей і всіма зацікавленими сторонами, проблема недостовірності емпіричних даних, звуження статистичних даних до категорій стать і вік, недостатня популяризація модельного мислення¹², на жаль, обмежують можливості моделювання в розробленні практичних рекомендацій щодо стримування епідемії і пом'якшення її наслідків. Нагальним завданням є підготовка до можливих майбутніх епідемій, що вимагає великої роботи з подолання виявлених під час епідемії коронавірусу проблем моделювання та використання результатів під час ухвалення рішень.

¹¹ https://kse.ua/wp-content/uploads/2020/12/KSE_COVID-19-weekly-briefing_20201224_vFin.pdf?fbclid=IwAR0II8rWgQICCCLDplUfiqyxzBMreeCnOJuaKbVqYjdDwhmoPb6my1Q0ZcA

¹² Прикладом популяризації знань у галузі моделювання епідемій є цикл лекцій ГО In Situ. <https://www.youtube.com/watch?v=9Njsn2glz8l>

References

- Currie, C. M., Fowler, J. W., Kotiadis, K., Monks, T., Onggo, B. S., Robertson, D. A., & Tako, A. A. (2020). How simulation modelling can help reduce the impact of COVID-19. *Journal of Simulation*, 14(2), 83–97. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1751570>
- Edmonds, B. (2020, April 13). Good Modelling Takes a Lot of Time and Many Eyes. *Review of Artificial Societies and Social Simulation*. <https://rofasss.org/2020/04/13/a-lot-of-time-and-many-eyes/>
- Edmonds, B., Le Page, C., Bithell, M., Chattoe-Brown, E., Grimm, V., Meyer, R., Montañola-Sales, C., Ormerod, P., Root, H., & Squazzoni, F. (2019). Different Modelling Purposes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(3), 6. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/3/6.html>
- Epstein, J. M. (2009). Modelling to contain pandemics. *Nature*, 460(7256), 687. <https://doi.org/10.1038/460687a>
- Ferguson, N., Laydon, D., Nedjati Gilani, G., et al. (2020). Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/Imperial-College-COVID19-NPI-modelling-16-03-2020.pdf>
- Gaudou, B., Huynh, N. D., Philippon, D., Brugière, A., Chapuis, K., Taillandier, P., Larmande, P., & Drogoul, A. (2020). COMOKIT: a modeling kit to understand, analyze and compare the impacts of mitigation policies against the COVID-19 epidemic at the scale of a city. *Front. Public Health*. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.563247>
- Hofstede, G., Hofstede, G. J., & Minkov, M. (2010). *Cultures and organizations: Software of the mind*. McGraw-Hill.
- Manzo, G. (2020). Complex Social Networks are Missing in the Dominant COVID-19 Epidemic Models. *Sociologica*, 14(1), 31–49. <https://doi.org/10.6092/issn.1971-8853/10839>
- Page, S. E. (2018). *The Model Thinker: What You Need to Know to Make Data Work For You*. Basic Books.
- Page, S. E. (2020, May 7). Which pandemic model should you trust? Here's how to evaluate them. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/politics/2020/05/07/which-pandemic-model-should-you-trust-heres-how-evaluate-them/>
- Squazzoni, F., Polhill, J. G., Edmonds, B., Ahrweiler, P., Antosz, P., Scholz, G., Chappin, É., Borit, M., Verhagen, H., Giardini, F., & Gilbert, N. (2020). Computational Models That Matter During a Global Pandemic Outbreak: A Call to Action. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(2), 10.
- Steinmann, P., Wang, J. R., van Voorn, G. A. K., & Kwakkel, J. H. (2020, April 17). Don't try to predict COVID-19. If you must, use Deep Uncertainty methods. *Review of Artificial Societies and Social Simulation*. <https://rofasss.org/2020/04/17/deep-uncertainty>

O. Pugachova

MODELLING COVID-19 EPIDEMIC AND ITS SOCIAL CONSEQUENCES

The paper studies different approaches to modelling COVID-19 transmission. It is emphasized that the variety of models proposed for forecasting the dynamics of epidemic and its long-term socio-economic consequences deals with the complexity of the object under investigation. So the multiplicity of models makes it possible to describe different aspects of complex reality. It is also highlighted that agent-based simulation is more suitable for modelling social aspects of the processes (human behaviour, social interactions, collective behaviour, and opinion diffusion) in the situation of deep uncertainty.

The computer experiments with the parameters of the model are analysed on the basis of a number of agent-based models in NetLogo, namely epiDEM and ASSOCC. It is demonstrated that the dynamics of COVID-19 has different scenarios, and agent-based modelling is a powerful tool in political decision-making, taking into account social complexity that often exhibits unpredictable output of intervention policy.

The role of agent-based modelling in social learning is also discussed. It is pointed out that social learning can reduce the impact of unsubstantiated statements and rumors that are not always adequate to the situation. It is also stressed that social learning could influence social behaviour that, in turn, facilitates the development of social patterns that reduces the likelihood of disease spreading. Attention is paid to the idea that involving people into the modelling process is a part of effective anti-epidemic policy because of the sensitivity of the output of political intervention to the behavioural reaction.

It has been shown that today the ideas of agent-based modelling are widely used by social scientists worldwide. The aim of this endeavour is not only to overcome the current pandemic and its long-term socio-economic consequences but also to prepare for new challenges in the future. The paper is also aimed at paying attention to the lack of agent-based models in Ukraine that could help policy-makers in developing practical recommendations and avoiding undesirable scenarios.

Keywords: COVID-19, modelling, agent-based models, intervention policy.

Матеріал надійшов 28.02.2021

