

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Центр післядипломної освіти _____
(повна назва)

Кафедра _____ Програмної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Дослідження моделей розповсюдження епідемії для прогнозування
найгарячіших точок
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи ПЗМ-21-3 _____
Жульєв Д. І. _____
(прізвище, ініціали)

спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення
(код і повна назва спеціальності)

_____ Освітньо-наукова програма _____
(тип програми)

_____ Інженерія програмного забезпечення _____
(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ доц каф. Програмної Інженерії Вечур О.В. _____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри, проф. _____ 3.В.Дудар

2023 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Центр післядипломної освітиКафедра Програмної інженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

(код і повна назва)

Тип програми освітньо- наукова програмаОсвітня програма Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУстудентові _____ Жульєва Данила Ігоревича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження моделей розповсюдження епідемії для прогнозування найгарячіших точокзатверджена наказом університету від “ 24 ” березня 20 23 р. № 412 Ст

заповнюється вручну після отримання наказу

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 31 травня 2023 р.3. Вихідні дані до роботи епідемії, моделі їх розповсюджень, прогнозування розповсюджень епідемії4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі мета роботи, аналіз проблемної галузі, постановка задачі, аналіз існуючих методів і алгоритмів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка*
1.	Аналіз предметної галузі	15.02.2023	Виконано
2.	Огляд існуючих методів	12.03.2023	Виконано
3.	Методи та алгоритми тестування	09.04.2023	Виконано
4.	Підготовка пояснювальної записки	25.04.2023	Виконано
5.	Спецчастина	30.04.2023	Виконано
6.	Підготовка презентації та доповіді	03.05.2023	Виконано
7.	Попередній захист	09.05.2023	Виконано
8.	Нормоконтроль, рецензування	19.05.2023	Виконано
9.	Занесення диплома в електронний архів	19.05.2023	Виконано
10.	Допуск до захисту у зав. кафедри	23.05.2023	
* заповнюється вручну після виконання чергового пункту			

Дата видачі завдання 17 січня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц каф. ІІ Вечур О.В. _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ / ABSTRACT

Кваліфікаційна робота магістра містить: 64 с., 16 рис., 36 джерел, 4 дод.

ЕПІДЕМІЇ, МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕПІДЕМІЙ, ГАРЯЧІ ТОЧКИ, ПРОГНОЗУВАННЯ, РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕПІДЕМІЙ, ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ.

Метою роботи є дослідження моделей розповсюдження епідемії для прогнозування найгарячіших точок.

В роботі розглядаються моделі розповсюдження епідемії, способи їх сповільнення та ефективність.

В результаті роботи проведено дослідження моделей розповсюдження епідемії.

EPIDEMICS, EPIDEMIC SPREAD MODELS, HOT SPOTS, FORECASTING, EPIDEMIC SPREAD, SPREAD PREDICTION.

The purpose of the work is to study the models of the spread of the epidemic to predict the hottest spots.

The work examines the models of the spread of epidemics, ways of slowing them down, and their effectiveness.

As a result of the work, a study of epidemic spread models was carried out.

Я, Жульєв Данило Ігоревич, студент групи ПЗм-21-3, здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні, кафедра Програмної інженерії, заявляю: моя кваліфікаційна робота на тему «Дослідження моделей розповсюдження епідемії для прогнозування найгарячіших точок», що буде представлена до ЕК для публічного захисту, виконана самостійно, в ній не містяться елементи плагіату і вона може бути опублікована в електронному архіві відкритого доступу ElArKhNURE. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим положенням «Про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНОЇ ГАЛУЗІ	10
1.1 Епідемії	10
1.2 Боротьба з епідеміями	16
1.3 Розповсюдження епідемій	19
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ.....	22
3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	27
4 РОЗГОРТАННЯ МОДЕЛІ	30
4.1 Різниця підходів до COVID-них обмежень.....	30
4.2 Розроблена модель.....	33
4.3 Варіанти розвитку подій	35
4.3.1 Сценарій «засоби відсутні»	36
4.3.2 Сценарій «пізно схаменулись»	39
4.3.3 Сценарій «оптимальні заходи»	41
4.3.4 Сценарій «Найжорсткіші заходи»	43
4.4 Висновки.....	44
4.5 Майбутні напрямки досліджень.....	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЗ – програмне забезпечення

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я

ООН – Організація Об'єднаних Націй

ММСП – Міжнародні медико-санітарні правила

SARS – Severe acute respiratory syndrome

SIR – Сприйнятливі-інфіковані-одужали

SEIR – Сприйнятливі-Виявлені-Інфіковані-Видалені

SIS – Сприйнятливий-інфікований-чутливий

ВСТУП

Епідеміологічні моделі – це математичні інструменти, які використовуються для прогнозування поширення інфекційних захворювань, таких як, наприклад, пандемії COVID-19. Ці моделі можуть допомогти розробникам політики та посадовим особам охорони здоров'я зрозуміти потенційний вплив різних втручань, таких як заходи соціального дистанціювання чи стратегії розповсюдження вакцини, і прийняти обґрунтовані рішення щодо того, як реагувати на епідемію.

Існує кілька різних типів епідеміологічних моделей, які можна використовувати для прогнозування поширення епідемії, зокрема:

– моделі «Сприйнятливі-інфіковані-одужали» (SIR): ці моделі поділяють населення на три групи: сприйнятливі (ті, хто ризикує заразитися), інфіковані та одужали (ті, хто одужав або помер) [1];

– моделі «Сприйнятливий-інфікований-чутливий» (SIS): ці моделі подібні до моделей SIR, але вони не включають групу одужали. Натомість люди, які видужали від інфекції, знову стають чутливими [2];

– моделі чутливих до інфекційних захворювань (SEIR): ці моделі додають до моделі SIR групу «підданих інфекції» для врахування інкубаційного періоду інфекції [3]. До зараженої групи входять особи, які були інфіковані, але ще не є заразними.

Епідеміологічні моделі можуть бути корисними для прогнозування поширення епідемії та виявлення потенційних гарячих точок, але вони настільки точні, наскільки точні дані, використані для їх створення. Важливо використовувати високоякісні дані та ретельно розглядати припущення, що лежать в основі моделі. Крім того, ефективність втручань може змінюватися залежно від конкретного контексту та населення, тому важливо враховувати місцеві фактори під час прогнозування та планування втручань.

Мета даної роботи полягає у вивченні моделей поширення епідемій з метою передбачення «гарячих точок» (hotspots) – областей або спільнот, які мають

високий ризик швидкого поширення інфекційних хвороб. Це важливе завдання, оскільки точне передбачення поширення епідемії дозволяє публічним органам здоров'я приймати ефективні рішення та розробляти стратегії втручання.

У цьому дослідженні планується аналізувати різні епідеміологічні моделі, такі як SIR, SIS та SEIR, з метою визначення їх потенційної ефективності у передбаченні «гарячих точок». Дослідники будуть звертати увагу на використані дані та припущення, що лежать в основі моделей, і враховуватимуть їх вплив на точність передбачень.

У роботі будуть оцінюватись різні підходи до ідентифікації «гарячих точок» на основі модельних прогнозів. Можуть розглядатись фактори, які впливають на поширення інфекції, такі як густина населення, мобільність, соціальні контакти тощо. В результаті цієї роботи планується розробити підходи та методи, які допоможуть ідентифікувати потенційні можливості допомоги конкретних методів для завадження розвитку «гарячих точок» з максимальною практичною застосовністю.

Отримані результати можуть бути використані в публічних органах здоров'я для прийняття рішень щодо введення превентивних заходів, моніторингу та реагування на епідемічні випадки. Врешті-решт, метою даної роботи є покращення наших знань про поширення епідемій та здатність передбачати «гарячі точки», що сприятиме ефективнішому управлінню інфекційними хворобами та зменшенню їх впливу на громадське здоров'я.

Крім того, дана робота може допомогти у вдосконаленні моделей передбачення поширення епідемій в майбутньому. Шляхом аналізу даних і порівняння різних моделей, можна виявити їх сильні та слабкі сторони, що створить основу для подальшого розвитку та покращення епідеміологічних моделей.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНОЇ ГАЛУЗІ

1.1 Епідемії

За достеменно відому історію людства в світі вже встигла відбутись достатня кількість різних епідемій. Епідемії бувають різних масштабів, поняття епідемії (від лат. *epidemia* або грец. *επιδημία* означає «поширений у народі»), від *ἐπι* – на, серед *ἰδής* – народ) людство класифікує як прогресуюче поширення інфекційного захворювання серед людей, що значно перевищує зазвичай реєструється на даній території рівень захворюваності і здатне стати причиною [4]. Багато медичних відомств розраховують власні епідемічні пороги для звичайних захворювань, виходячи з середньостатистичного рівня цього захворювання протягом багатьох років.

Графік захворюваності, коли спалахує епідемія, зазвичай типовий (див. рис. 1.1), хоча інколи і бувають відмінності у вигляді декількох повторних розгорянь хвороби, які можуть йти одна за одною, або повертатися через якийсь час (рік чи два, а інколи навіть десятки років).

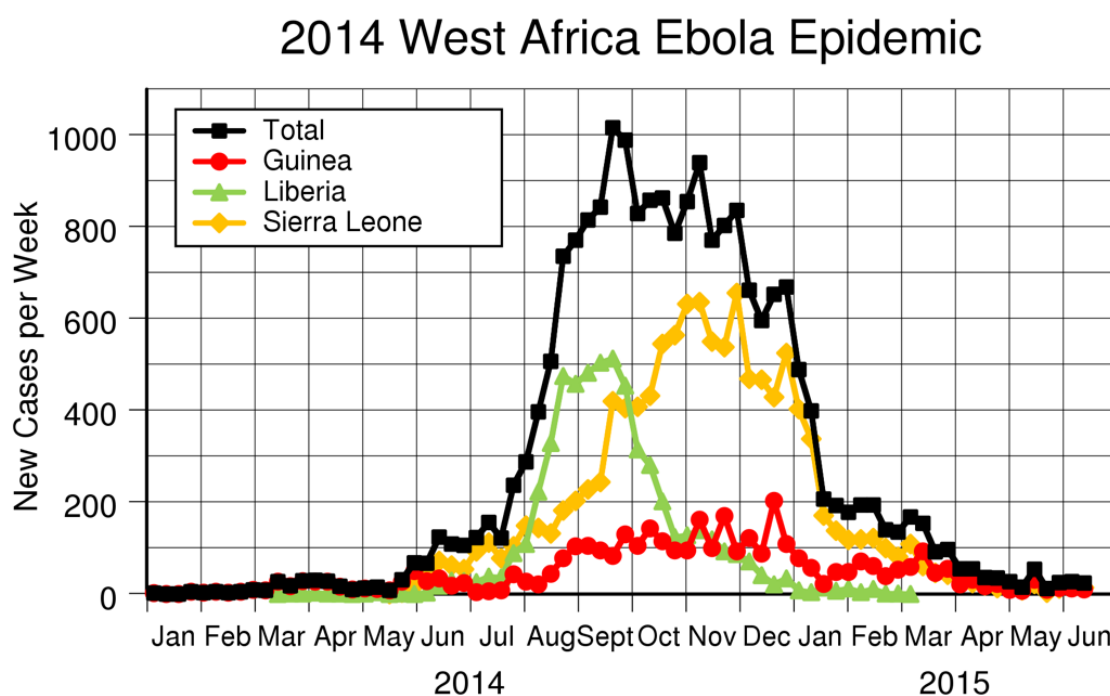


Рисунок 1.1 – Типовий графік захворюваності

Епідемії, так чи інакше, зазвичай або уносять багато людських життів (як це було раніше, коли людство ще не було розвиненим в медицині та зазвичай лікувало всі хвороби настоянками, які не мали під собою жодного медичного підґрунтя, або й зовсім довіряли лікування вигаданим богам), або, виходячи із зазначеного вище визначення поняття, мають велику кількість захворілих людей.

Пандемія (грец. “pandemia” – весь народ загалом) є надзвичайно сильною епідемією, що поширилася біля країн і континентів, вищий рівень розвитку епідемічного процесу [5].

Проте більшість епідемій проходять та забуваються. Хоча деякі з них справляють велике враження на людей та запам'ятовуються на багато років або залишають незабутній слід. Розглянемо найвідоміші та найзнаковіші епідемії в історії людства.

«Чума Антонінов» (III століття н. е.) у середземноморському світі найімовірніше, була епідемією натуральної віспи [6]. Вона стала наслідком контактів між цивілізацією Середземномор'я (Рим) та Індійською цивілізацією. Паралельно з нею така сама епідемія спалахнула у Китаї. Вона також стала наслідком контактів цивілізацій між Китаєм та Індією. Для населення Заходу та Далекого Сходу це була «нова хвороба». До неї не було імунітету. Тому наслідки були тяжкі.

«Чума Антонінов» призвела до депопуляції Римської Імперії. Різко зросла вартість фізичної праці. Рабство стало неефективним. Бракувало ресурсів стримувати натиск варварів. Імперія валилася. Жах перед епідемією та повсюдна паніка призвели до послаблення віри у старих богів. На цьому тлі відбулося закономірне поширення християнства, яке стало релігією порятунку в цьому великому регіоні. Християни не боялися смерті, робили милосердні вчинки, дбали про вмираючих, будували лікарні. Це було важливим фактором для подальшого офіційного визнання християнства як офіційної релігії у середземноморському світі. Така сама ситуація мала місце у той самий час і в Китаї, де сталося поширення буддизму — ще однієї «релігії порятунку».

Наслідки тієї епідемії були величезними. На Заході впала Римська Імперія. На Далекому Сході розпалася Ханьська Імперія. З'явилися «релігії спасіння» - християнство та буддизм. На рубежі III та IV століть н. е. у середземноморському (західному) світі та далекосхідному (китайському) світі почав вибудовуватися новий тип соціальної організації — церква (громада віруючих). На Заході суспільство за короткий період стало християнським, на Далекому Сході буддистським. Загалом відповіддю на цю глобальну епідемію у двох головних регіонах світу стало зміцнення релігійності. Відбулися глибокі зміни у сфері моралі.

Наступною значною епідемією була «Юстиніанова чума» VI століття н. е. на Близькому Сході [7]. Вважають, що це була перша пандемія бубонної чуми. Нам відомо, що вона стала найвищим проявом кризи Візантійської Імперії. Їй передували довгі роки війни Візантії та Персії, голод. Від чуми постраждали обидві імперії. Мрія візантійського імператора відродити Рим провалилася. Величезні території у Східному Середземномор'ї, Малій Азії та Північній Африці обезлюдніли. Утворився політичний та демографічний вакуум, який був заповнений ісламом. Історичним наслідком чуми стала поява арабської держави та ісламу як світової релігії.

«Чорна смерть» XIV ст., мабуть, відома всім. Вона була другою пандемією бубонної чуми [8]. Від неї постраждали Китай та західний християнський світ. Причини виникнення достеменно невідомі. Дехто дотримується гіпотези, що вона стала наслідком відродження контактів між цивілізаціями Заходу та Далекого Сходу. Ці контакти було перервано після III століття зв. е. Населення Європи, як і населення Китаю, не знайоме з цією хворобою. Це була «нова хвороба». Після монгольського завоювання та створення трансконтинентальної монгольської імперії відродився Шовковий шлях, активізувалася торгівля на великі відстані. Природні осередки чуми (зоонози) розкидані євразійськими степами — від Монголії до України. Інфекція передалася і Китаю, і Європу. Наслідки були тяжкі. У Європі утворилися численні осередки чуми. Рознощиками хвороби стали

гризуни. В умовах зростання кількості міст, антисанітарії, постійних воєн у Європі епідемії чуми не припинялися ще три сторіччя.

Віспа та інші інфекції в Америці у XVI столітті. Відкриття Нового Світу супроводжувалося занесенням віспи та інших хвороб із Європи до Америки, де населення Мексики і Перу до них був імунітету. Для Америки це були нові хвороби. В результаті вимерло 95% корінного населення Мексики та Перу. Загинули цивілізації ацтеків та інків. Через два століття подібна історія повторилася в Австралії та Океанії, де контакти європейців з аборигенами призвели до їхнього масового вимирання.

Поширення віспи в Америці призвело до швидкого завоювання європейцями цього континенту. Багатства Америки ринули до Європи. Ввезення капіталу сприяло розвитку капіталізму. Віспа в Америці також стала важливим фактором виникнення глобальної торгівлі та європейського колоніалізму.

Англійський піт, або англійська пітлива гарячка була інфекційною хворобою неясної етіології, що часто закінчувалася смертельним наслідком протягом декількох годин з моменту появи перших симптомів, кілька разів відвідувала Європу (насамперед тюдорівську) у 1485-1551 роках [9].

«Англійський піт» мав, швидше за все, неанглійське походження і прийшов до Англії разом з династією Тюдорів. У серпні 1485 року Генріх Тюдор, що жив у Бретані, граф Річмонд, висадився в Уельсі, переміг у битві при Босворті Річарда III, вступив до Лондона і став королем Генріхом VII. За його військом, що складалося в основному з французьких та бретонських найманців, по п'ятах йшла хвороба. За два тижні між висадкою Генріха 7 серпня та битвою при Босворті 22 серпня вона вже встигла проявитися. У Лондоні за місяць (вересень — жовтень) від неї померло кілька тисяч людей. Потім епідемія вщухла. Народ сприймав її як погане знамення для Генріха VII: «йому судилося правити у муках, знаменням тому була пітна хвороба на початку його правління».

У 1492 році хвороба прийшла до Ірландії як англійська чума, хоча ряд дослідників стверджує (посилаючись на відсутність вказівок на піт як симптом у джерелах), що це був тиф.

У 1507 та 1517 роках хвороба спалахувала знову по всій країні: в університетських Оксфорді та Кембриджі померла половина населення. Приблизно в цей же час англійський піт проникає і на континент, в Кале (тоді ще англійське володіння) і Антверпен, але це були тільки локальні спалахи.

У травні 1528 року хвороба з'явилася в Лондоні вчетверте і лютувала по всій країні; сам Генріх VIII змушений був розпустити двір і залишити столицю, часто змінюючи резиденцію. Цього разу хвороба серйозно перекинулася на континент, з'явившись спочатку в Гамбурзі, потім дійшла до Швейцарії, через усю Священну Римську імперію поширилася на схід у Польщу та Росію і на північ до Норвегії та Швеції. Зазвичай скрізь епідемія тривала не більше як два тижні. Франція та Італія залишилися незайманими нею. До кінця року піт зник скрізь, окрім сходу Швейцарії, де він тримався до наступного року.

Останній спалах стався в Англії 1551 року.

У XVIII-XIX століттях у Франції з'являлася подібна хвороба, відома як «пикардійський піт», але це була інша хвороба, оскільки, на відміну від англійського поту, супроводжувалася висипом.

Після припинення епідемій чуми у Європі головною хворобою стала віспа в Європі, Росії та Північній Америці у XVIII столітті. Її осередками стали великі міста. Тут зіграв роль закон великих чисел. Носіння віспи можливе лише у великих популяціях, з високим рівнем народжуваності та дитячої смертності. Повсюдні спалахи, фактично ендемії віспи, часто-густо впливали і на повсякденне життя, і на велику політику. Вмирили монархи. Десятками тисяч гинули солдати. У Північній Америці віспа стала причиною масового вимирання індіанців. Це дозволило європейцям розпочати заселення Північного Сходу, Канади (XVIII століття), і Дикого Заходу (XIX століття). Віспа на американському континенті стала важливим чинником появи такої держави, як США.

Відповідь, яку дали Європа та Росія на віспу, відома. Освічена світська влада почала боротися з цією хворобою. Але карантини були неефективні, оскільки влада хотіла заохочувати розвиток торгівлі як місцевої, так і глобальної. Тому монархії століття Просвітництва стали заохочувати особливі «біополітичні» підходи.

Першим ефективним інструментом біополітики стала вакцинація населення. Спочатку – варіоляція, потім вакцинація. Наукового пояснення для неї не було до кінця XIX століття (Пастер), але засіб добре себе показав скрізь – від Північної Америки до Росії.

Перші серйозні осередки наступної значної епідемії (холера XIX століття в Індії, Європі, Росії та Північній Америці) з'явилися в Індії [10]. У вологому тропічному кліматі цієї країни холера вважалася звичайною сезонною інфекцією. З приходом до Індії англійців все змінилося. Британська колоніальна політика порушила місцевий громадський спосіб життя. Встановлені британцями фіскальні закони змушували мільйони індійців довго залишатися на тих самих місцях. Жителям не дозволялося вести кочовий спосіб життя, який був традиційним способом уникати небезпечних холерних місць. Уникнути зараження холерою для простих індійців не було можливості. Невдовзі це спричинило страшні наслідки. Низка соціально-економічних криз перетворила холеру зі звичайної хвороби на незагасну епідемію. Починаючи з 1817 року, епідемії холери вже не припинялися. За лише XIX століття було п'ять пандемій холери, і всі вони починалися в Індії.

Досвід боротьби з чумою та віспою допоміг владі в Європі, Росії та Північній Америці знайти ефективні заходи боротьби з холерою. Вакцинацій не було. Часто використовувався карантин, але цей захід викликав невдоволення всіх верств суспільства. Особливо були незадоволені торгово-промислові верстви, для яких карантин був гірший за холеру. Тому в Англії, а потім і в інших країнах взяв гору новий підхід — соціальна гігієна. З'явилися санітарні лікарі, санітарна інспекція тощо. Розвинулася практика особистої гігієни. Мило, кип'ятіння води, водогін, каналізація тощо. З'являється «медицина для населення», соціальна медицина, ядром якої є санітарна медицина. На цій хвилі вживаються перші заходи щодо охорони громадського здоров'я. Починається створення засад національних систем охорони здоров'я.

На початку XX століття у всіх розвинених країнах з'явилися національні системи охорони здоров'я. Зміцнився авторитет медичних працівників. Було створено багато різних вакцин. Почалося швидке викорінення небезпечних

інфекцій — чуми, холери, віспи, дитячих інфекцій тощо. Відбулося покращення матеріального благополуччя. Посилився санітарний порядок. Особиста гігієна стала нормою.

У 1914 році почалася глобальна світова криза – Перша світова війна. Повсюдно на теренах, де велися військові дії, відбувалися спалахи епідемій — тиф, скарлатина, кір, навіть чума. Але заходи боротьби з ними були відомі, тому так чи інакше лікарям вдавалося справлятися з цим.

Проте проблемою продовжували залишатися інфекційні хвороби, що передаються повітряним шляхом. Квінтесенцією проблеми став грип. Правду кажучи, це не була «нова хвороба». Із грипом стикалися і раніше. Згадаймо, «англійський піт» XVI століття. Але виник новий чинник – глобальні транспортні сполучення. Закінчення Першої світової призвело до пересування величезних мас людей [11]. Мільйони колишніх солдатів вирушили додому. Грип-іспанка з'явився на всіх континентах. Найбільших збитків зазнало населення колоніальних країн, особливо Індії та Африки, де служби охорони здоров'я, по суті, були відсутні. Але навіть там, де вони були, втрати були більшими. Особливо болісно реагувала на «іспанку» Європа та Північна Америка – найрозвиненіші частини світу, жертв епідемії і там було дуже багато.

1.2 Боротьба з епідеміями

Такі масові захворювання, як чума, тиф, холера, віспа, лепра, різні види пандемічного грипу та багато інших інфекцій постійно супроводжували людину протягом усієї історії її існування у формі епідемій і пандемій, що періодично спалахували.

Міжнародний вимір цієї проблеми виявилось досить рано. Вже наприкінці XVIII століття виник перший організаційний механізм реалізації міждержавних заходів проти епідемічного характеру – Міжнародна санітарна рада у Танжері. У

1830-і – 1840-ті роки аналогічні поради виникли у Константинополі, Каїрі, Тегерані та інших місцях. Наприкінці XIX – на початку XX століття були засновані міжнародні організації в галузі охорони здоров'я: Міжнародний Комітет Червоного Хреста (1863 р.), Міжнародне бюро суспільної гігієни (1907 р.), Організація охорони здоров'я Ліги Націй (1919 р.), Міжнародний комітет військової медицини (1921 р.) .) і, нарешті, Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) [12]. До 7 квітня 1948 р. Статут ВООЗ ратифікували 26 країн-членів ООН. Цей день вважається датою остаточного оформлення ВООЗ та відзначається щороку як «Всесвітній день здоров'я». У середині XX століття було організовано першу міжнародну санітарну конференцію у Парижі.

В даний час ВООЗ є найбільшою міжурядовою спеціалізованою установою ООН, що об'єднує 193 держави. Діяльність організації спрямовано досягнення проголошеної в 1977г. соціальної мети ВООЗ та її держав-членів – досягнення всіма жителями планети такого рівня здоров'я, який дозволить вести їм продуктивне життя в соціальному та економічному планах.

Прийняті у ВООЗ для реалізації цієї мети Глобальна та регіональні стратегії досягнення здоров'я для всіх визначають напрямки її практичної діяльності:

- боротьба з інфекційними та неінфекційними хворобами;
- питання здоров'я та охорони здоров'я у контексті соціально-економічного розвитку;
- дії у надзвичайних ситуаціях та гуманітарні операції;
- епідеміологія, статистика, оцінка тенденцій та медико-санітарна інформація;
- наукові дослідження та розвиток систем охорони здоров'я;
- якість, безпека та ефективність лікарських засобів та біологічних препаратів;
- репродуктивне здоров'я, охорона здоров'я сім'ї;
- здорова поведінка та охорона психічного здоров'я;
- харчування та безпека харчових продуктів;
- гігієна навколишнього середовища;

– оцінка екологічних небезпек.

Велике практичне значення для держав-членів має оперативна епідеміологічна та регулярна наукова інформація, що поширюються ВООЗ, а також обґрунтовані та апробовані рекомендації та готові результати досліджень, що проводяться в центрах, що співпрацюють з ВООЗ.

У 1951 р. держави-члени ВООЗ прийняли Міжнародні санітарні правила, що у 1969 р. були переглянуті та стали іменуватися Міжнародними медико-санітарними правилами (ММСП) [13]. Починаючи з 1995 р., правила переглядалися в рамках міжурядового процесу з урахуванням нових епідеміологічних знань і накопиченого досвіду, а також у відповідь на зміни, що відбуваються у світі, і на зростання загроз глобальній безпеці в галузі охорони здоров'я. На міжнародному рівні було досягнуто розуміння необхідності вироблення кодексу поведінки, що дозволяє не лише протидіяти таким загрозам, а й забезпечити заходи у відповідь у сфері охорони здоров'я, не створюючи зайвих перешкод для міжнародної торгівлі та перевезень. Процес перегляду ММСП було завершено 2005 р.

Згідно з ММСП редакції 2005 р., одним із завдань ВООЗ є «запобігання міжнародному поширенню хвороб, запобіганню від них, боротьбі з ними та вжиття заходів у відповідь на рівні громадської охорони здоров'я, які можна порівняти з ризиками для здоров'я населення та обмежені ними і які не створюють зайвих перешкод для міжнародних перевезень та торгівлі».

Пандемії та масові захворювання стали одним із найбільш серйозних глобальних викликів сучасності, що зумовлено появою нових інфекційних хвороб (більше 30 за останні 35 років, включаючи такі, як ВІЛ/СНІД, атипову пневмонію (SARS) та нові штами пандемічного грипу), поверненням старих та здавалося б, переможених загроз (чума, віспа, поліомієліт), а також появою стійких до традиційних ліків форм різних захворювань. Починаючи з 1970-х років, нові хвороби реєструються з безпрецедентною частотою – по одній і більше на рік. В даний час існує близько 40 масових захворювань, невідомих попередньому поколінню [14].

Загроза поширення лихоманки Ебола за межі Західної Африки у 2014 р. змусила багато держав світу об'єднати зусилля і виступити єдиним фронтом проти цієї хвороби. Пандемія коронавірусної інфекції, стала найсерйознішою глобальною загрозою безпеці в галузі охорони здоров'я, що надає колосальний негативний вплив на економічну і політичну стабільність, торгівлю, туризм, доступ населення до товарів і послуг, а в перспективі і на демографічну ситуацію.

Наслідки поширення епідемій, пандемій та масових захворювань можна умовно поділити на медичні, економічні, соціальні та політичні, а також юридичні [15].

1.3 Розповсюдження епідемій

Менш ніж за перші півроку спалах нового вірусу (COVID-19) заразив мільйони людей. Те, що почалося в місті, ВООЗ оголосила пандемією. Вірус поширювався експоненціально і подвоювався кожні кілька днів (див. рис. 1.2), тобто без будь-яких профілактичних заходів.

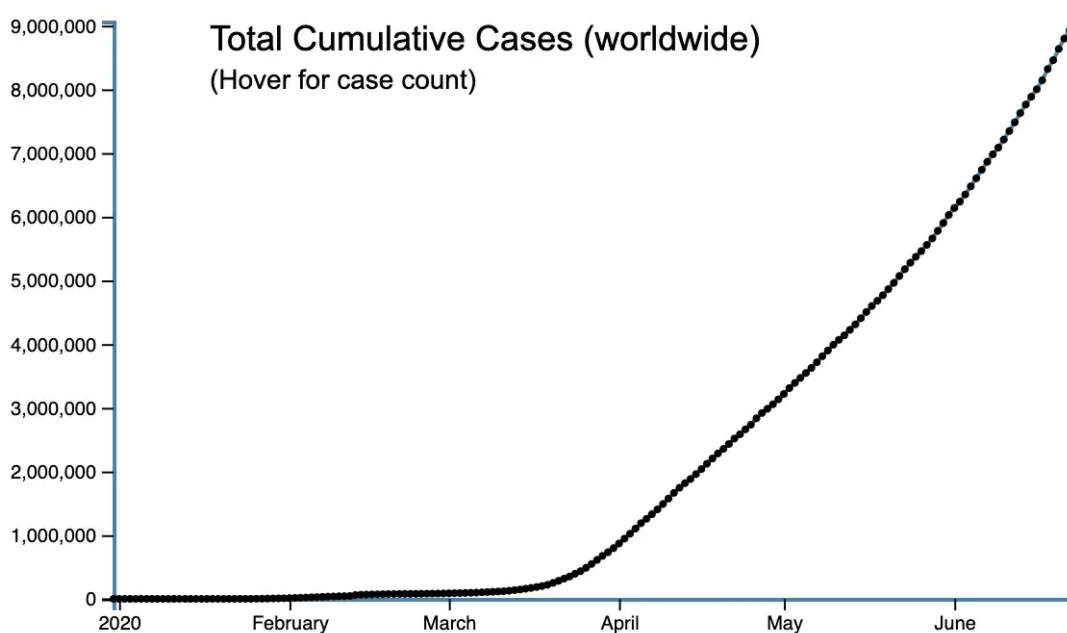


Рисунок 1.2 – Поширення захворюваності епідемії коронавірусу в перші місяці

Повертаючись до початку даної епідемії, вже можна аналізувати розповсюдженість вірусу та робити висновки відносно пандемії.

Це експоненціальне зростання лякає, але його можна уповільнити, якщо люди будуть застосовувати «соціальне дистанціювання» та інші карантинні заходи. Щоб зрозуміти важливість цих дій, тут буде змодельовано поширення такої хвороби в гіпотетичному місті. Поширення хвороби моделюватиметься у геометричному регіоні, розділеному на різні спільноти. Люди можуть подорожувати між такими спільнотами, і їхній рух буде контролюватися за допомогою матриці ймовірності переходу.

Перш ніж рухатися далі, доведеться оцінити значення зараження та рівень одужання. Для цього для даного прикладу використаємо дані Німеччини, оскільки Німеччина також має одну з найбільших кількості тестів на початок пандемії і почала тестування та запис даних від першого пацієнта, та саме Німеччина є країною, що за перші півроки перетнула пік зараження, і активні випадки почали спадати.

Використаємо модель SIR для даного прогнозування. Модель SIR є однією з найбільш вивчених і надійних компартментних моделей, і багато моделей є похідними від цієї базової форми. Модель складається з трьох відділень: $S(t)$ для кількості сприйнятливих, $I(t)$ для кількості інфікованих і $R(t)$ для кількості видалених (одужали, померлих або імунних) осіб у певний час. Модель SIR є динамічною в тому сенсі, що кількість осіб у трьох штатах змінюється з часом. Ми будемо моделювати SIR без життєвої динаміки, тобто не враховуватимемо народження чи смерть, окрім самої хвороби, що робить загальну популяцію постійною. Одна з ідей цього полягає в тому, що динаміка таких хвороб, як COVID-19, набагато швидша, ніж динаміка народжуваності та смерті.

На рисунку 1.3 можна побачити результати передбачуваного та актуального рівнів захворюваності.

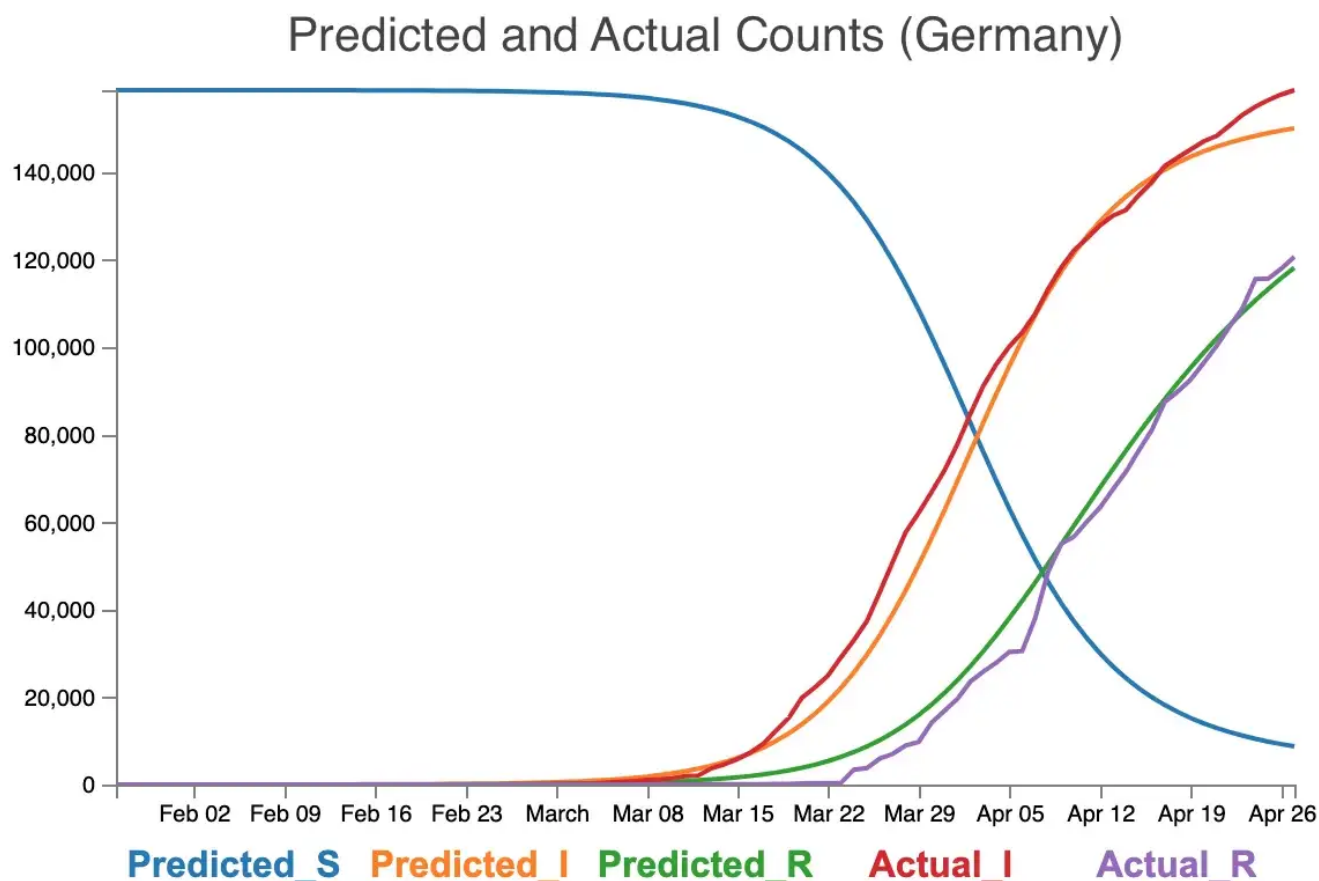


Рисунок 1.3 – Передбачувана та актуальна кількість

Як показує практика, можна вводити запобіжні заходи для зменшення розповсюдженості епідемій. Можна вводити локдауни, закриваючи людей удома, давати людям можливість покидати будинок лише для відвідин магазинів або не залишати навіть такої можливості, відмінити концерти та закривати заклади загального харчування або великого скупчення людей. Можна вводити маскові режими, робити обов'язковими постійні тестування, перекривати переміщення людей між країнами та містами.

Зі зменшенням живого спілкування між людьми зменшуватиметься рівень розповсюдженості пандемії. Проте збільшуватимуться медичні, економічні, соціальні та політичні, а також юридичні наслідки. Це може бути тимчасовими заходами для приборкання пандемії, доки будуть впроваджені довготриваліші рішення.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ

Розглянемо три основні моделі, які використовуються для прогнозування поширення епідемії:

- статистичні методи для відстеження спалахів і для розпізнавання конкретних просторових моделей захворювання;
- математичні моделі для прогнозування поточного поширення епідемії в контексті статистичного моделювання;
- для прогнозування поточного зростання епідемії та використання машинного навчання або експертних методів.

Машинне навчання виявилось корисним у кількох сферах прогнозування ризиків. Основна увага приділяється ризику інфікування, ризику тяжкості та ризику наслідків. Більша частина ризику зараження полягає у виявленні ймовірності зараження COVID-19 для конкретної людини чи групи. Ризик також розглядає те, що медичне лікування не було успішним для конкретної особи чи групи, і наскільки вони можуть померти. Виходячи з зазначеного вище ризику, машинне навчання має кілька методів, як-от Нейв Байєс, SVM і нейронна мережа, випадкові для прогнозування епідемічних захворювань. Ранні дані свідчать про те, що вік, існуючі захворювання, гігієнічні практики в цілому, соціальна поведінка, кількість людських взаємодій і наявність контактів, соціально-економічний статус, місце розташування та клімат є ключовими факторами загрози, які визначають, чи людина заразиться COVID-19.

Наприклад, багато авторів використовували опанування технологій для створення попереднього індексу вразливості COVID-19. Профілактичні кроки, такі як маскування, миття рук і соціальне дистанціювання, також можуть знизити загальний ризик. Коли стає доступною все більш розширена інформація, а результати досліджень, що тривають, з'являються, з'являються додаткові реалістичні додатки для оволодіння системою для прогнозування ризику зараження. Багато людей зазнають найсильніших легких симптомів, навіть якщо

інші отримують важке захворювання легенів або гострий респіраторний дистрес-синдром (ГРДС), який, без сумніву, є смертельним. Лікування та спостереження недоступні будь-кому, хто має незначні ознаки та показання, тому, якщо є ймовірність появи більш серйозних ознак та симптомів, набагато легше розпочати лікування на ранній стадії.

Прогнозування результату процедури є розширенням передбачення інтенсивності, яке також є просто підрахунком прогнозування способу життя та смерті. Очевидно, що з іншими симптомами корисно знати, які шанси пацієнта вижити. Навіть на цьому етапі важливо пам'ятати, що не всі інфіковані люди отримують однакове лікування всередині. Якщо ми зможемо передбачити результати різних підходів до догляду, лікарі зможуть ефективніше працювати з інфікованими пацієнтами.

Вчені також використовували інструменти, які отримують знання про прогнозування реакції імунотерапії раку. Тим не менш, оскільки з'являються варіанти вирішення проблеми COVID-19, для прогнозування результатів вивчаються конкретні методи лікування. Крім того, прогнозування результатів залишається важливим аспектом оцінки небезпеки, що працює разом із прогнозуванням забруднення та інтенсивності, згаданим вище.

На рисунку 3.1 приведено структуру моделі машинного навчання для прогнозування.

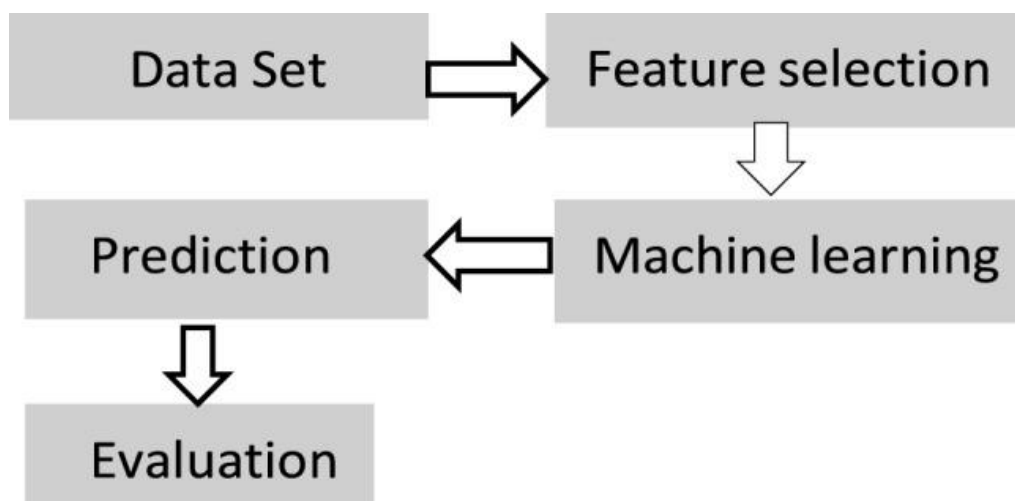


Рисунок 3.1 – Структура моделі машинного навчання для прогнозування

Наведений вище рисунок показує структуру будь-якої моделі машинного навчання для прогнозування. Версія машинного навчання краще тестує метод у масштабі. Перекладаючи вміст публічних взаємодій у соціальних мережах, модель навчання пристрою оцінює ризик зараження новим вірусом. Модель може бути не в змозі класифікувати людей на основі характеру, навіть тоді обидва ці документи можна використовувати для моніторингу поширення пандемії в режимі реального часу та прогнозування її в найближчі тижні. Прогнозування загрози недавніх пандемій і правильне прогнозування того, чи перейде коронавірус від однієї людини до іншої, допоможе лікарям і медичним працівникам передбачити потенційні пандемії та об'єднати їх відповідним чином. Походження коронавірусу досі точно не встановлено. Дослідники все ще проводять багато досліджень щодо кількох аспектів походження COVID-19 і намагаються обґрунтувати свої висновки. Хоча необхідні подальші дослідження для встановлення прогнозу прямої передачі, знання того, які впливи найімовірніше зроблять стрибок, є важливим першим кроком у підготовці до пандемії.

2.1 Математичне моделювання з використанням багатофакторного логістичного регресійного аналізу та модифікованої моделі SEIR

Початкове прогнозування моделювання інфекційних захворювань є дуже важливою потребою для подальшого аналізу. Логістична модель використовується переважно в галузі епідеміології. Вивчення факторів ризику певного захворювання є нормальним і прогнозування ймовірності виникнення певного захворювання відповідно до факторів ризику. За допомогою логістичного регресійного аналізу ми можемо приблизно передбачити закон розвитку та передачі епідеміології.

Багатофакторний логістичний регресійний аналіз – це додавання двох або більше (тобто простих) регресій, у яких дві або більше окремих змінних (X_i) беруться до уваги одночасно, щоб передбачити значення залежної змінної (Y) для

кожного суб'єкта. Залежна змінна є дихотомічною або категоріальною (тобто мультиноміальною або порядковою) змінною при застосуванні моделей логістичної регресії.

Наприклад, дані отримані з перевірених активів, таких як Університет Джона Хопкінса, ВООЗ і веб-сайт Ding Xiang Yuan, схвалений урядом Китаю. Окрім випадків одужання, зареєстровані сайти показали випадки COVID-19 і смерті в уражених іноземних місцях і районах. Знайомство з комп'ютером підтвердило свою користь для прогнозування ризиків у багатьох регіонах. Ризик зараження: наскільки ймовірно, що персонаж або сутність заразиться COVID-19? Імовірність серйозності: наскільки ймовірно, що конкретна особа чи організація відчує серйозні ознаки та симптоми або ускладнення COVID-19, які вимагатимуть госпіталізації чи інтенсивної терапії? Ризик результату: яка ймовірність того, що певна стратегія буде невдалою для конкретної особи чи організації, і наскільки ймовірно, що вони загинуть у результаті? Вік, існуючі захворювання, загальні моделі гігієни, соціальна поведінка, кількість контактів з людьми, частота контактів, соціально-економічний статус, місце розташування та клімат, наприклад, можуть вважатися важливими факторами, використовуючи цей набір даних для оцінки ризику (співвідношення шансів) COVID-19. Загальну форму моделі багатовимірної логістичної регресії можна надати так:

$$p = \frac{\exp(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p)}{1 + \exp(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p)}$$

Рисунок 2.2 – Форма моделі багатовимірної логістичної регресії

Імовірність результату, наведеного у наведеному вище рівнянні. Значення рівняння наявне і кодується як 1 або 0, від X_1 до X_p є різними незалежними змінними щодо параметрів, необхідних для ідентифікації ймовірного результату Сприйнятливого, а також враховується вся ймовірність Викритого, Інфікованого та Видаленого, відповідно; а від b_0 до b_p – коефіцієнти регресії. Модель множинної

логістичної регресії часто записується по-різному. Результат – це передбачений журнал шансів того, що результат буде присутній у формі нижче. Щоб спрогнозувати спалах за допомогою моделі багатофакторної логістичної регресії, враховуються всі змінні, що стосуються результату для Сприйнятливі-Виявлені-Інфіковані-Видалені (SEIR).

На рисунку 2.3 приведено моделі для визначення правильності прогнозу.

$$p\left(\frac{ds}{dt}\right) = \frac{-\beta S(t)I(t)}{N}$$

А)

$$p\left(\frac{dE(t)}{dt}\right) = \frac{-\beta S(t)I(t)}{N} - \sigma E(t)$$

Б)

$$p\left(\frac{dI(t)}{dt}\right) = \sigma E(t) - \gamma I(t)$$

В)

$$p\left(\frac{dR(t)}{dt}\right) = \gamma I(t).$$

Г)

Рисунок 2.3 – Моделі для визначення правильності прогнозу

В приведених вище формулах наступні змінні відповідають за:

S(t): кількість чутливих людей у провінції.

E(t): кількість опромінених людей (у провінції).

I(t): кількість інфікованих людей у провінції.

R(t): Кількість одужань або смертей (у провінції).

Відповідно до результатів дослідження, реалізація прогнозу динаміки епідемічного захворювання щодо ризику інфікування може бути досягнута за допомогою моделі багатовимірної логістичної регресії на основі модифікованого SEIR. Дослідження також сприятиме впровадженню роботи над інструментом аналізу даних для досягнення кращої точності.

3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Проблема, яка розглядається в дослідженні моделей поширення епідемії для прогнозування гарячих точок, полягає в необхідності точного прогнозування поширення та впливу спалаху інфекційного захворювання з метою інформування про політику громадського здоров'я та стратегії втручання.

Існує кілька різних типів епідеміологічних моделей, які можна використовувати для прогнозування поширення епідемії, зокрема:

– моделі «Сприйнятливі-інфіковані-одужали» (SIR): ці моделі поділяють населення на три групи: сприйнятливі (ті, хто ризикує заразитися), інфіковані та одужали (ті, хто одужав або помер). Моделі SIR можна використовувати для прогнозування частки населення, яка з часом буде інфікована, і кількості випадків, які виникнуть;

– моделі «Сприйнятливий-інфікований-чутливий» (SIS): ці моделі подібні до моделей SIR, але вони не включають групу одужали. Натомість люди, які видужали від інфекції, знову стають чутливими. Моделі SIS часто використовуються для моделювання поширення інфекцій, що передаються статевим шляхом;

– моделі чутливих до інфекційних захворювань (SEIR): ці моделі додають до моделі SIR групу «підданих інфекції» для врахування інкубаційного періоду інфекції. До зараженої групи входять особи, які були інфіковані, але ще не є заразними.

Епідеміологічні моделі, такі як моделі SIR, SIS і SEIR, можна використовувати для прогнозування поширення епідемії та виявлення потенційних гарячих точок, але точність цих прогнозів залежить від якості даних, використаних для створення моделей, і припущень, що лежать в основі модель. Існує потреба в розробці та оцінці епідеміологічних моделей, які могли б точно передбачити поширення епідемії та визначити потенційні гарячі точки, щоб отримати

інформацію для прийняття рішень у сфері охорони здоров'я та запобігти подальшому поширенню хвороби.

Мета даної роботи полягає в розробці та оцінці моделей передбачення поширення епідемій з метою вчасного введення найбільш результативних засобів у епіцентрі «гарячих точок». Це має на меті поліпшити розуміння процесів поширення інфекцій та сприяти прийняттю ефективних заходів для контролю інфекційних хвороб та збереження громадського здоров'я.

Подальшою метою є впровадження отриманих результатів в практику публічного здоров'я. Застосування ефективних моделей передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок" дозволить урядам, міжнародним організаціям та медичним установам приймати обґрунтовані рішення щодо введення обмежувальних заходів, розподілу ресурсів та організації моніторингу для ефективного контролю епідемій.

Крім того, метою є сприяння подальшому розвитку і вдосконаленню епідеміологічних моделей. Це може включати вдосконалення алгоритмів, використання нових даних, урахування більш широкого спектру факторів, що впливають на поширення хвороби, і розробку інноваційних методів аналізу даних. Такі дослідження допоможуть зрозуміти складність епідеміологічних процесів і сприятимуть вдосконаленню підходів до прогнозування поширення інфекційних хвороб.

Актуальність даної роботи визначається наступними факторами:

– глобальні епідемії: світ стикається з ростом глобальних епідемій, таких як COVID-19. Це підкреслює необхідність розробки ефективних методів передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок". Розуміння механізмів поширення хвороб та точне прогнозування можливих уражень допоможуть приймати кращі рішення щодо превентивних заходів та реагування;

– застосування в публічному здоров'ї: ідентифікація "гарячих точок" має велике значення для публічного здоров'я. Це дозволяє зосередити ресурси та інтервенції на вразливих територіях або спільнотах, де ризик поширення хвороби найвищий. Одержання точних передбачень із значущими "гарячими точками"

допоможе забезпечити ефективнішу організацію і використання обмежувальних заходів та ресурсів;

– розвиток модельних підходів: дослідження в галузі передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок" вимагає постійного розвитку модельних підходів. Оновлені моделі та методи можуть бути більш точними та універсальними, здатними враховувати широкий спектр факторів, таких як соціальні контакти, мобільність та географічні особливості, що впливають на поширення хвороби;

– попередження майбутніх епідемій: за допомогою епідеміологічних моделей і прогнозування "гарячих точок" можна не тільки реагувати на поточну епідемію, але й забезпечити попередження майбутніх епідемій. Розуміння механізмів поширення хвороб і виявлення "гарячих точок" допоможе розробити стратегії превентивних заходів, підготовку та планування, що зменшить вплив майбутніх епідемій на суспільство та громадське здоров'я;

– поглиблення наукових знань: дослідження, спрямовані на екзамінацію моделей поширення епідемій з метою передбачення "гарячих точок", вносять вагомий внесок у поглиблення наших наукових знань про епідеміологію. Це допомагає уточнити і вдосконалити існуючі моделі, розширити наше розуміння про механізми поширення хвороб та знаходити нові способи виявлення "гарячих точок".

Отже, актуальність даної роботи полягає у необхідності точного передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок" для підвищення ефективності публічного здоров'я, прогнозування майбутніх епідемій та поглиблення наукових знань про епідеміологію.

4 РОЗГОРТАННЯ МОДЕЛІ

4.1 Різниця підходів до COVID-них обмежень

У березні 2020 року, коли, сподіваючись приборкати першу хвилю коронавірусної пандемії, європейські країни почали одна за одною вводити жорсткі вимоги масової самоізоляції, Швеція вирішила випробувати іншу стратегію боротьби з пандемією.

Щоб мінімізувати неминучі економічні збитки від зупинки промисловості та закриття сфери послуг, у Стокгольмі вирішили зробити ставку на колективний імунітет. Введені там у результаті обмежувальні заходи були значно м'якшими, ніж у сусідніх країнах, і мали переважно рекомендаційний характер.

Наприклад, усю весну минулого року, доки більшості європейців було фактично заборонено виходити з дому без поважної причини, у Швеції можна було збиратися групами до 50 осіб. Тільки ближче до зими максимальну кількість учасників зборів знизили до восьми – і то не дуже довго.

Ходити в масках шведам було офіційно рекомендовано лише у січні 2021 року. До цього людина, яка з'явилася на людях з маскою на обличчі, викликала в кращому разі здивовані погляди оточуючих, а іноді й невітніші коментарі на свою адресу, повідомляє місцева преса.

Якщо в більшості країн для боротьби з вірусом влада насамперед закрила навчальні заклади, то шведські школи продовжували працювати у звичайному режимі. Вакцинація, що почалася в країні кілька місяців по тому – справа теж абсолютно добровільна. На відміну від більшості інших європейських країн, у Швеції щеплення не зобов'язані робити навіть лікарі та інші співробітники системи охорони здоров'я.

Юридично жодної різниці між щепленими та нещепленими жителями теж немає: і для тих, і для інших діють абсолютно однакові правила та рекомендації.

При цьому ще в 2020 році аналітики відзначали, що ситуація, що склалася в Швеції, багато в чому досить унікальна. Зокрема, жителі там традиційно довіряють

владі, а тому показують високий рівень самодисципліни і дотримуються навіть необов'язкових рекомендацій.

Крім того, на початку пандемії в країні ще й склалася сприятлива політична ситуація: запропонована стратегія боротьби з вірусом не викликала принципових заперечень у жодної партії політичного спектру.

Втім, ідеалізувати шведів також не варто. У місцевій пресі можна знайти чимало й інших історій: батьки, які відмовилися відпускати дітей до школи навіть під загрозою штрафу – зі страху, що підхоплять там інфекцію; роботодавці, які наполегливо закликали або навіть зобов'язали співробітників повернутися в офіс, незважаючи на офіційну рекомендацію влади працювати з дому; відвідувачі ресторанів, які щодня зсувають разом спеціально розставлені співробітниками подалі один від одного столи.

Але чи спрацювала ухвалена стратегія? Наскільки шведській владі вдалося врятувати економіку країни, звичайно ж, важливо, але головне питання все ж таки – чи не довелося заплатити за це життями своїх співгромадян?

Італійські вчені, які вивчили статистику смертей з 67 країн світу, дійшли висновку, що у 2020 році у Швеції надмірна смертність (тобто кількість загиблих, що перевищує середньорічні показники) виявилася значно вищою, ніж у більшості країн Північної Європи [16].

Якщо бути точним, у сусідній Фінляндії "зайвих" смертей душу населення було зафіксовано вшестеро менше; у Німеччині, Естонії та Латвії – у два з невеликим; в Норвегії – і зовсім у 50 разів.

Втім, автори роботи закликають не поспішати з однозначними висновками: наприклад, у Польщі чи Литві, де обмежувальні заходи були значно суворішими, цей показник удвічі вищий за шведський (167 проти 85). Україна ж в даному рейтингу має досить близький показник до Швецького (90 проти 85).

Офіційні показники смертності від вірусу дають дещо інше співвідношення, але в цілому картина виходить дуже схожою: за цим показником Швеція випереджає сусідні Фінляндію та Норвегію майже в 10 разів, Естонію та Німеччину – приблизно у півтора рази, але так само поступається Польщі та Литві.

Наймасштабнішу базу даних зібрали для дослідників Аріель Карлінські з кафедри статистики Єврейського університету в Єрусалимі та Дмитро Кобак з Університету Тюбінгена у Німеччині. Вони ведуть облік надмірної смертності у світі, від початку пандемії.

На даний момент там можна переглянути статистику загиблих зі 104 країн та територій [17].

Згідно з цими даними, надмірна смертність у Швеції так само випереджає показники Фінляндії та Німеччини – але при цьому залишається нижчою, ніж майже у всіх інших країнах Євросоюзу (за винятком Ірландії та Люксембургу). Отже, навряд чи можна стверджувати, що стратегія шведської влади (ставка на колективний імунітет) повністю провалилася [18]. Хоча – дивлячись із чим порівнювати.

«Зі всіх скандинавських країн Швеція дійсно постраждала найбільше – яким методом не вважай, – погоджується Аріель Карлінські. – Можливо, якби там вчинили так само, як у Данії, Норвегії, Фінляндії, то можна було б не тільки уникнути надмірної смертності, але і зменшити середній показник смертності за попередні роки [як це сталося у Данії]».

Втім, автори всіх робіт наголошують, що робити висновки щодо ефективності обмежувальних заходів у тій чи іншій країні поки що дуже рано [19]. А може, й зовсім не має особливого сенсу.

За словами експертів, величезний вплив – можливо, значно більший, ніж приписи влади – на показники смертності в тій чи іншій країні мають інші чинники. Такі як якість медичних послуг та пропускна спроможність національної системи охорони здоров'я, а також клімат, щільність населення, культурні норми, що діють там, тощо.

Редакція журналу Economist, яка веде власний аналіз ходу пандемії, дійшла досить несподіваного висновку: різниця серед жертв на душу населення найпростіше пояснюється не строгістю введених заходів і навіть не географією, а економікою [20]. Якщо бути точним – рівнем нерівності в конкретній країні: чим

більший розрив між багатими та бідними, тим вищий показник надмірної смертності на душу населення.

4.2 Розроблена модель

Розглянемо розроблену модель [21].

Дана модель розглядає одне місто, де на момент початку мешкає абсолютно здорова популяція. Джерелом зараження є жителі, що повертаються в місто з деякою частотою з-за кордону, які переносять вірус у стадії інкубаційного періоду. Доступні при огляді моделі дані приведено на рисунку 4.1.

Місто		Вірус	
Населення:	100000 осіб	Заразність при інкубаційному періоді:	5 %
Площа:	80000 у. о.	Заразність при активному періоді:	50 %
Вмістимість лікарень	2000 осіб	Імовірність смерті при лікуванні в лікарні	1 %
Межа паніки	30 %	Імовірність смерті БЕЗ лікарняного лікування	20 %
Швидкість приросту паніки	3 % у день	Відсоток одужання у лікарні	10 %
Захворюваність	5 осіб/день	Відсоток одужання поза лікарнею	3 %
		Якість виявлення хворих	15 %

Рисунок 4.1 – Модель

У даній моделі у захворювання є три стадії:

- початкова – безсимптомний інкубаційний період (ті, що «пасивно» хворіють);
- активна – з явним проявом симптомів (активно хворіють);
- термінальна – симптоми виявляються активно, хворий має ризик загинути, якщо йому не надати допомогу.

Перехід з початкової стадії в активну, а з активної в термінальну відбувається з певною заданою ймовірністю – причому також є ймовірність (невелика) самостійного одужання на будь-якій стадії [22]. У моїй моделі, «активним» хворим вважається той, хто має явно виражені симптоми, але продовжує ходити у своїх справах – у той час як «пасивний» хворий або не спостерігає за ними, або тихо-мирно сидить удома «з застудою».

Зараження відбувається випадково, причому його механізм досить хитро влаштований. На кожному з тактів симуляції, кожен із хворих має по дві перевірки на зараження ще однієї людини (умовно – у транспорті та на роботі/навчанні). У активних і термінальних хворих можливість заразити когось однакова і досить висока, у «пасивних» – низька.

У ймовірність заразити випадкову людину робить внесок і навколишнє міське середовище — висока щільність населення, висока соціальна активність, а також паніка, що зароджується, підвищують її [23]. У жителів міста є соціальне життя, активність якого випадково нерівномірна; багато хто, можливо, помічав, що в один день автобус, що підійшов з ранку, забитий битком, в інші — є вільні місця. Карантинні заходи, відповідно, знижують соціальну активність.

Ще одним важливим чинником є паніка. Ажіотаж, черги, забиті крамниці. Тут все просто – до заданого дня вона лінійно зростає до вказаної величини, а потім з тією самою швидкістю зменшується. Втім, її внесок не надто значний.

Міські служби теж грають свою роль. Кожен такт, всі «термінально» хворі безумовно вирушають госпіталями (якщо для них є місце) — вважається, що в цьому стані їх уже не треба шукати.

Деякий відсоток інших хворих (насамперед, «активних») відшукують випадковим чином – і вони теж вирушають до лікарень. Якщо в лікарнях місця вже немає, то такий хворий перетворюється на стан «пасивного» — відправляється додому із суворим наказом мінімізувати спілкування, через що стає менш заразним для оточуючих [24].

У лікарні кожен із хворих має (по одному на такт симуляції) шанс одужати та померти. Заходи з діагностики та лікування, відповідно, змінюють ці цифри.

Вилікований у лікарні або сам знову потрапляє в загальний пул здорових жителів міста — оскільки для коронавірусу характерна відсутність імунітету, що виробляється, то можливе й повторне зараження.

Симуляція відбувається з тактом о 12 годині — щодня припадає по два такти симуляції, що умовно відповідають ранковому та вечірньому станам міста.

Найцікавіша частина — це заходи, які вживає влада для того, щоб ліквідувати епідемію [25]. Можливих заходів багато, і можна спробувати багато різних їх поєднань, або пересунути застосування заходу на кілька днів раніше-пізніше, щоб побачити, як зміниться картина зараження.

4.3 Варіанти розвитку подій

Модель готова, тож тепер можна промоделювати різні варіанти. Для цього передбачено набір тестових пресетів (див. рис. 4.2).

Заходи протидії

Закриття кордонів | Термін епідемії 30 днів

Відміна концертів

Закриття шкіл і ВНЗ | Термін епідемії 50 днів

Закриття кафе-клубів-музеїв

Регулярна дезінфекція

Готові варіанти

Відсутні заходи | Запізні заходи | Оптимальні заходи | Жорсткі заходи

Моделювати на: 120 днів | Моделювати

Рисунок 4.2 – Налаштування способів протидії

Надалі розглянемо чотири головні сценарії, представлені шаблонами в даній моделі.

4.3.1 Сценарій «засоби відсутні»

Це сценарій заперечення чи ігнорування загрози до останнього – який, на щастя, не справдився майже ніде (на думку хіба що приходять країни на зразок Ірану, бо в тій же Швеції люди слідували порадам уряду).

Гіпотеза: Сценарій такий – новий вірус не прийняли всерйоз. Про нього нікому нічого не розповіли [26]. Влада не вжила жодних заходів, люди спокійно заражаються, а в новинах тиша. Для цього знизимо «Якість виявлення заражених» приблизно до 5%, і відключимо всі інші пункти.

Результати приведено на рисунку 4.3.

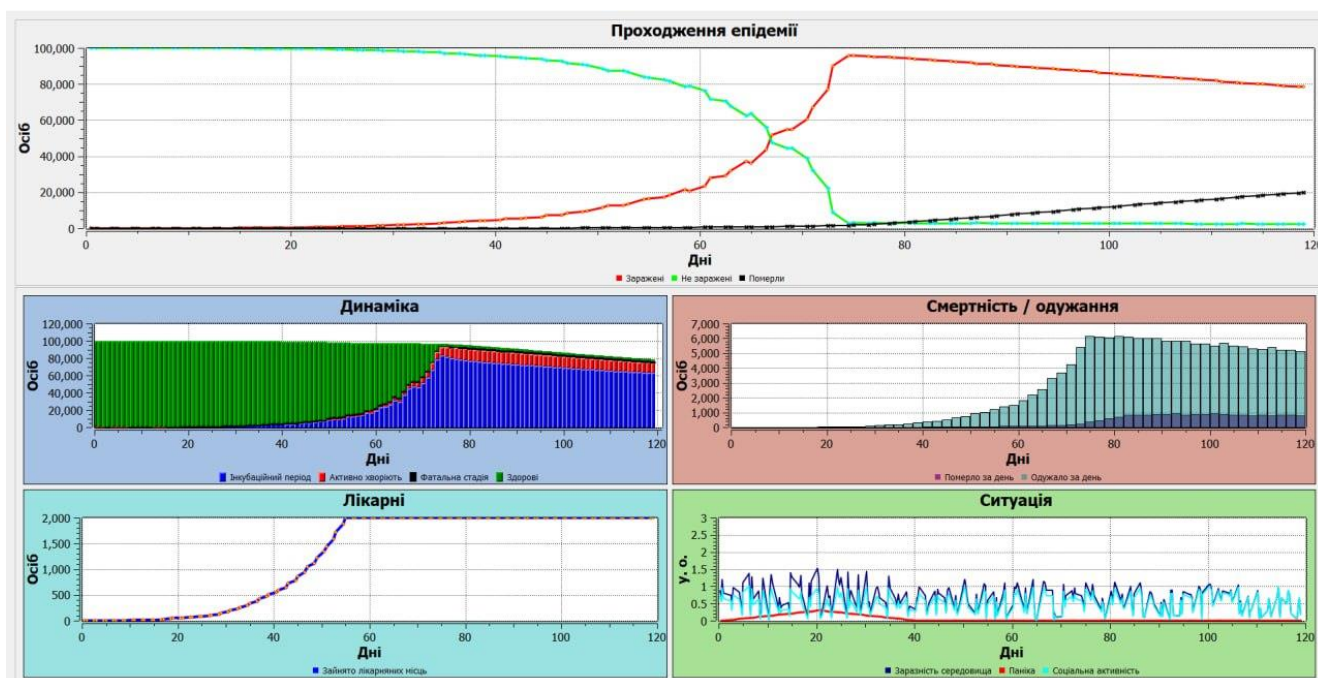


Рисунок 4.3 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли засоби протидії відсутні

Протягом перших днів зараження росте лавиноподібно, причому більшість із заражених, ймовірно, цього навіть не виявить. А далі ось він – це жахливе експоненційне зростання зараження, між 30-м і 60-м днями. Причому навіть збільшення числа лікарень тут не врятує – більшість популяції виявляється «пасивними» носіями. Число хворих в «активній» стадії виявляється практично незмінним за рахунок динаміки – лікарні лікують на межах можливого, люди одужують самі, хтось переходить у термінальну стадію. Ситуація починає чудово бути схожою на сезонну епідемію грипу, коли кашляє, здається, майже кожен. Та ось тільки коронавірус зовсім не грип, ті, хтовилікувався, не виробляють імунітету і хворіють повторно.

Серйозне зростання смертності починається з 60-го дня, і смертність пробиває 1% від населення всього маленького містечка на день. Справді, апокаліптичний сценарій.

На щастя, цей сценарій навряд чи має шанси на розвиток до тривалості в 100 днів – хоча б тому, що хтось схаменеться, коли рахунок смертей піде на сотні. Таке, в довгостроковому періоді, можливо хіба що у Середньовіччі, де хвороба вважається карою небес, і ні влада, ні сама людина за такий час не починають вживати абсолютно ніяких запобіжних заходів, радісно продовжуючи влаштовувати концерти і їздити в переповненому метро.

Висновок: що цікаво, навіть тут не відбувається картини, що малюється уявою деяких громадян, які миттєво вимирають. Експонента впирається в деяку стелю, заражати більше нема кого, і жертв стає досить багато — але ситуація стабільна.

Цікаво, що тут, що далі, кількість хворих в інкубаційному періоді зростає набагато швидше, ніж кількість заражених, що активно хворіють. Доходить до десятків невиявлених одного виявленого хворого. Крім того, кількість «активних» хворих постійно зменшується за рахунок діагностики та госпіталізації – тоді як кількість «пасивних» продовжує і продовжує додаватися, якщо своєчасно не лікувати «активних».

Гіпотеза: а чи можна приборкати епідемію, що вже вирвалася з-під контролю? Нехай з 65-го дня в країні запроваджується повний карантин, закривають кордони, працює у 4 рази більше лікарень, хворих інтенсивно лікують, а з 85-го вже й тести завезуть [27].

Результат такого розвитку подій приведено на рисунку 4.4.

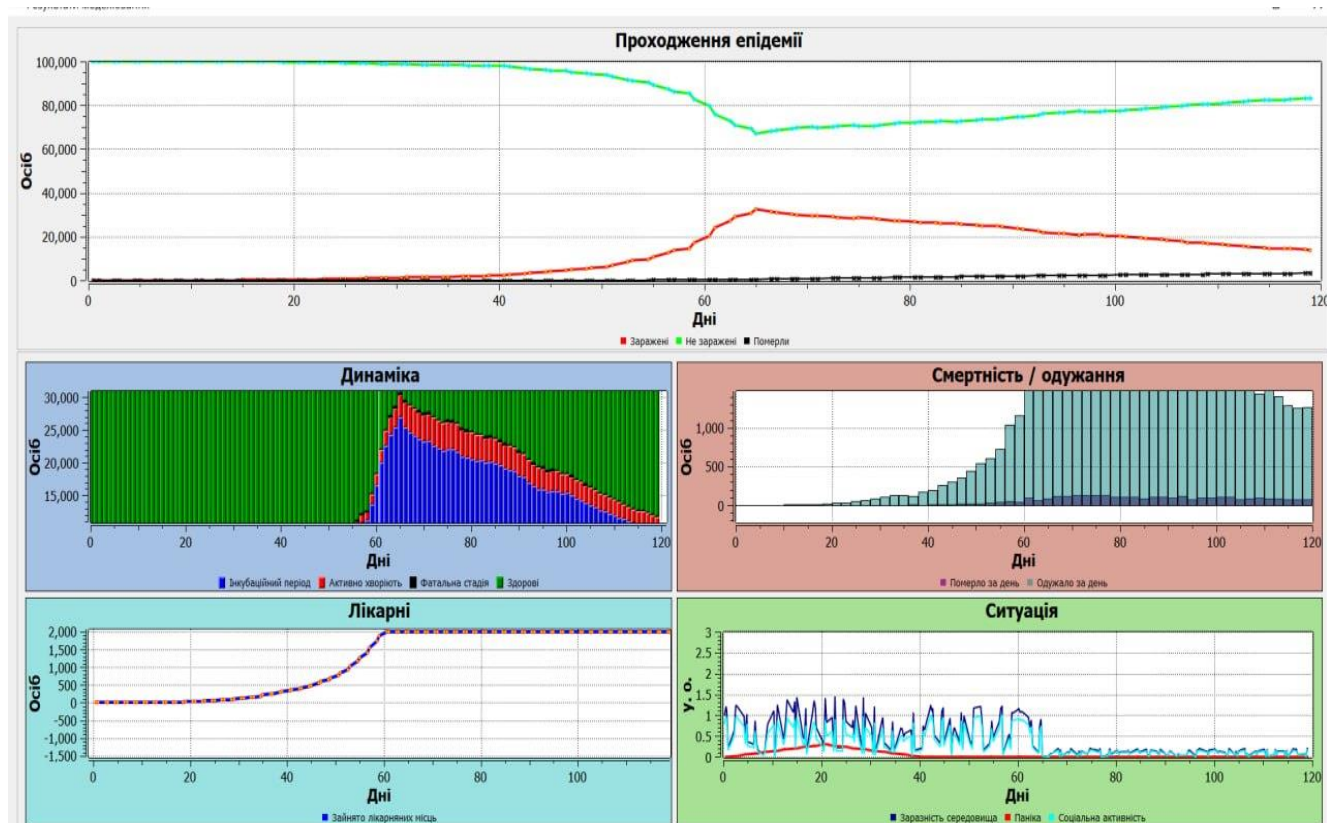


Рисунок 4.4 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли міри протидії введені на середині розповсюдження вірусу

Висновок: так, результати, якщо можна так сказати, позитивні, але з каверзою. Смертність після введення всіх цих заходів падає вкрай повільно (лікарні всі забиті, всіх все одно не вилікувати), і вперто тримається на високому рівні. Ситуацію в цьому випадку може врятувати хіба що вакцинація. Тож якщо вчасно не перехопити – то потім, навіть за великих зусиль, виправити ситуацію складно.

4.3.2 Сценарій «пізно схаменулись»

Швидше за все, щось подібне зараз і розгорталось в Італії. Початок поширення вірусу переглянули, а потім, як схаменулися – застосували все і відразу, але заражених було вже багато.

Гіпотеза: заходи такі:

- карантин для приїжджих запровадили через 20 днів після початку, ще за десятків – повністю закрили кордони;
- за два тижні закрилися школи, а незабаром обладнали більше місць у лікарнях, щоб справлятися з потоком заражених;
- після (на 55-й день) оголосили повний карантин;
- на 80-й підвезли вірусні випробування [28].

Задамо час моделювання в 120 днів, щоб бачити хвіст епідемії, який приведено на рисунку 4.5.

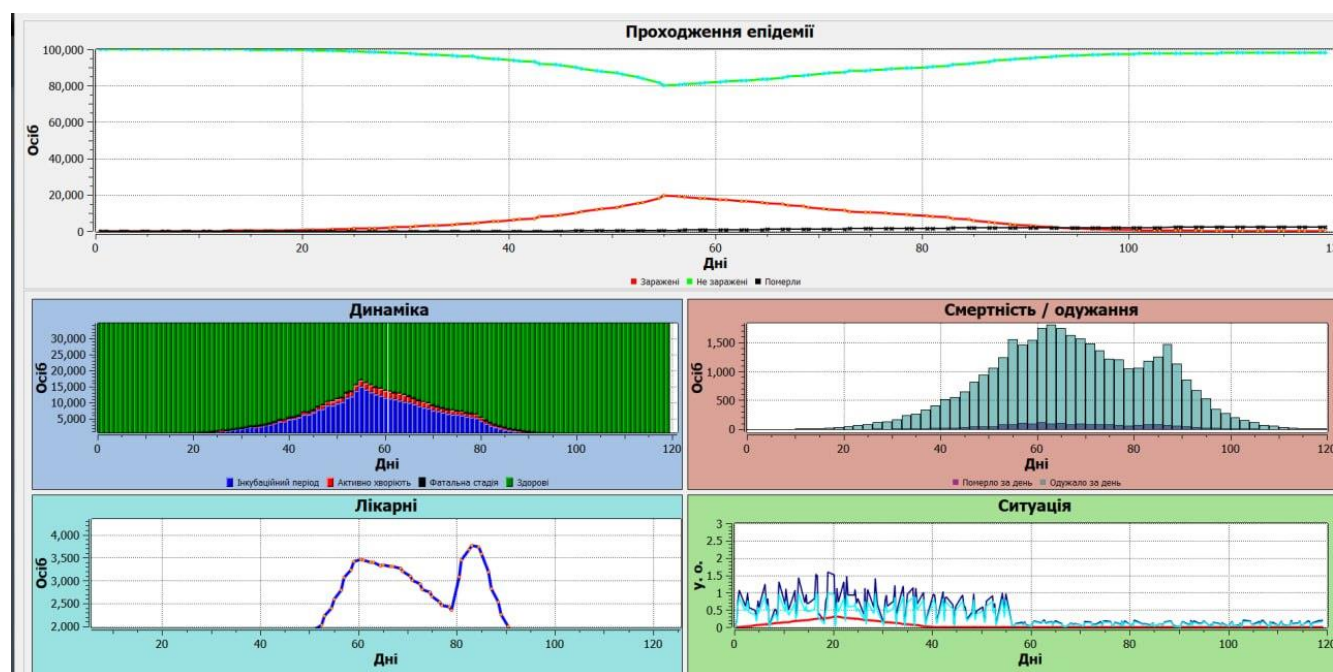


Рисунок 4.5 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли люди запізно схаменулись

Варто звернути увагу, що чисельність населення на графіку «Динаміка захворювання» навіть начебто «підросла» наприкінці – це повернулися до загального пулу жителі, які перебували у лікарнях.

Висновок: тішить те, що експоненційного зростання тут немає – його якраз встигають перехопити на самому початку, доки процес зараження ще не вийшов з-під контролю (див. рис. 4.6).

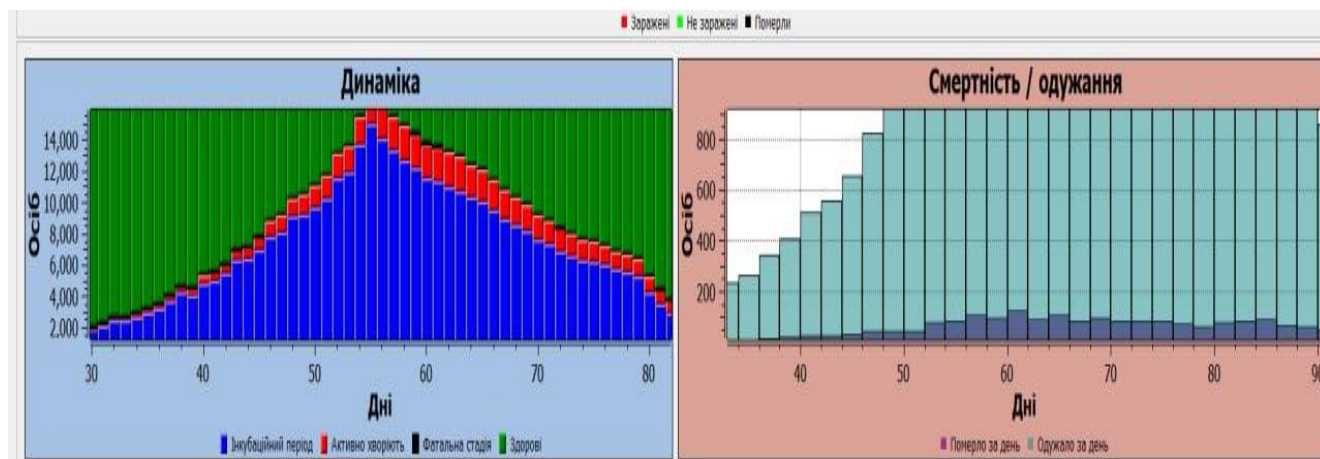


Рисунок 4.6 – Ілюстрації результату розповсюдження епідемії, якщо процес зараження не вийшов з-під контролю

Як видно, графік має дві цікаві точки – в районі 55-го дня і в районі 80-го. До введення карантину вірус ефективно зупинити не вдалося, і в найгірші дні гинули до 0.1% населення. Після запровадження карантину, заражені потроху переходили на «активну» стадію, виявлялися і виліковувалися – отже за період епідемії померло 0.5% населення міста, а епідемія була повністю задавлена. Якщо ж карантин запровадити пізніше днів на п'ять, то смертність зросте вже вдвічі.

Гіпотеза: а якщо антивірусні випробування так і не завезуть [29]? Результат приведено на рисунку 4.7.

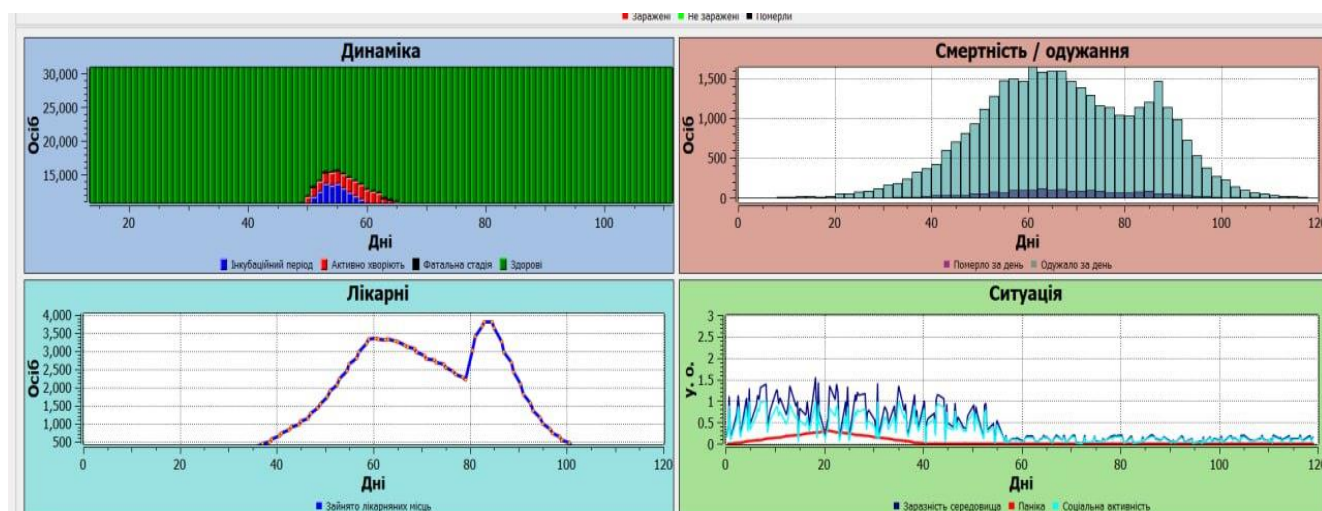


Рисунок 4.7 – Ілюстрації результату розповсюдження епідемії, якщо антивірусні випробування не поступають

Графік природно втратив другий пік, смертність зросла на 25%, а епідемія... розтягнулася. Тепер за 120 днів кінець ще не настав.

Висновок: це свідчить на користь крайньої необхідності тестів у цій ситуації!

4.3.3 Сценарій «оптимальні заходи»

Даний сценарій приводить огляд на сценарій, за яким відбулося вжиття вчасних заходів, але без зайвої суворості та важких ударів по економіці. Ймовірно, найбільш оптимальний у посталій ситуації для більшості країн.

Гіпотеза: влада не збирається поміщати наше місто «під ковпак», досить неохоче закриває все, і негайно вдається до необхідних заходів [30]. І цей сценарій приніс найбільше сюрпризів (див. рис. 4.8).

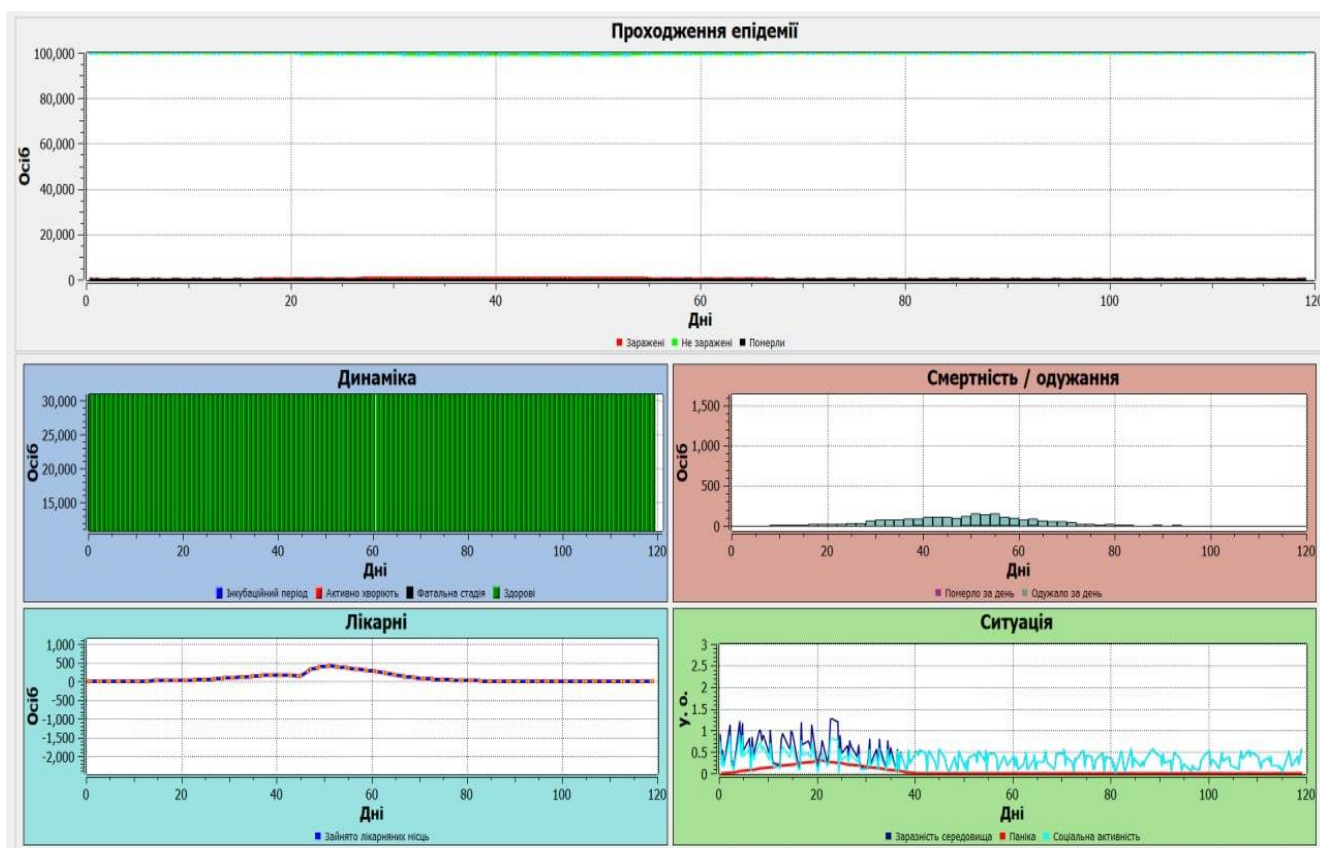


Рисунок 4.8 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли було вжито оптимальні заходи

Число заражених зовсім невелике, кількість загиблих можна порахувати на пальцях. Хороший сценарій, який не надто сильно б'є по економіці – закрито багато закладів, але транспорт ходить, і люди працюють. Цікаво, що закриття кордонів, звідки продовжують приїжджати нові хворі, при цьому особливої ролі не відіграє.

Іншим цікавим спостереженням є те, що в гірші дні ходить зараженими приблизно 0.5% всіх мешканців.

Висновок: тобто, в місті заразиться кожен двохсотий – і нічого, за правильних заходів це не викликає жахливих наслідків. Немає епідемії, місто не вмирає, лікарні стоять порожніми. При вірній організації справ коронавірус повинен спокійно піти у «фон», підтримуючись (у рамках моєї моделі) припливом заражених з інших країн.

Гіпотеза: А що, якщо тести та вакцина у нас взагалі не з'являться, і кордони не закриються [31]? Її результат приведено на рисунку 4.9.

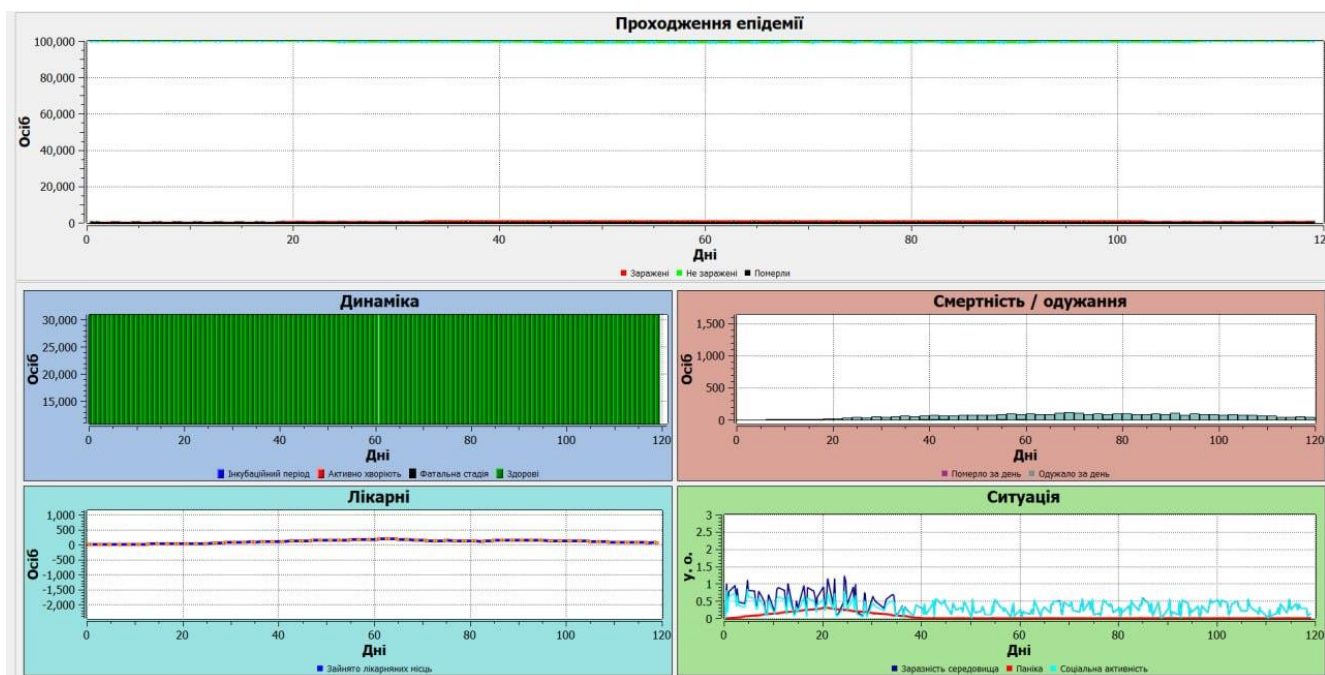


Рисунок 4.9 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли було вжито оптимальні заходи, але не закрити кордони та не використовувати тести

Висновок: той самий фон, але гірший. Число випадків залишається помітним, але поки що йде боротьба – все під контролем. Руйнівного спалаху немає.

4.3.4 Сценарій «Найжорсткіші заходи»

Даний сценарій розглядає варіант розвитку подій, коли було прийнято рішення для перестрашування закрити взагалі все? При даному сценарії було введено всі розумні заходи майже відразу, коли люди тільки вперше почули про вірус, а всі суворі трохи пізніше. Ще трохи, і перестануть ходити автобуси, а незабаром настане загальний карантин.

Гіпотеза: чи вдасться врятувати більше людських життів шляхом повного карантину, що вводиться раніше, ніж вірус почне серйозно гуляти по популяції [32]? Результат приведено на рисунку 4.10.

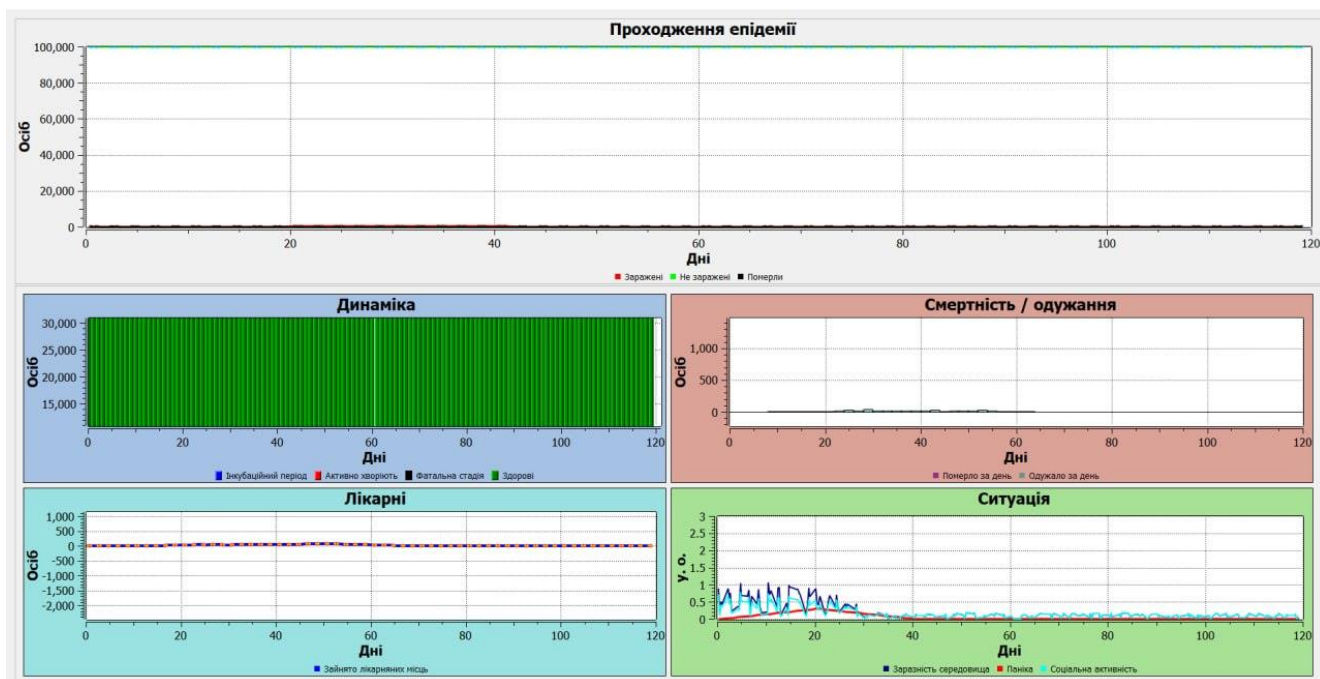


Рисунок 4.10 – Ілюстрації розповсюдження пандемії при сценарію, коли було вжито оптимальні заходи

Висновок: і справді було досягнуто трохи меншої смертності – на кілька десятків людей. Шляхом повної зупинки економіки. При цьому все одно за 100 днів не було позбавлено останніх заражень – то тут, то там проскакує людина, хвора на вірус. І даний сценарій розгортається при тому, що вакцинація і тести вже були введені.

4.4 Висновки

На підставі всіх приведених вище розрахунків, можна зробити наступні висновки:

– прийняті часткові засоби обмежень більш ефективні. Те, що робиться – не панічна метушня зі спробами зробити хоч якось і хоч щось. Якщо розрахунки правильні, то епідемію, в рамках цього набору заходів, буде стримано в досить

жорстких межах десь протягом місяця. Можливо, заходи треба буде підтримати трохи довше – наприклад, до літа, коли з'явиться вакцина;

– COVID-19 ми вже навряд чи позбудемося так, як, наприклад, позбулися Еболи. Те, що кажуть зараз відомі мікробіологи, цілком підтверджує приведена вище модель. Вірус піде "в народ" і стане тим, чим стали для нас неприємні хвороби на кшталт поліомієліту – небезпечним, але рідкісним захворюванням. До того ж даний вірус може мутувати;

– навколо нас вже може бути енна кількість заражених, які не знають про це. Це число зросте з часом, і підтримуватиметься не нижче за певний рівень – принаймні деякий час. Цифра «кожен двохсотий» здається дещо завищеною. Співвідношення «один виявлений хворий на десять не виявлених» — також здається переоціненим. Але треба враховувати, що зараженим може виявитися практично будь-хто (у тому числі і Ви самі, переносячи вірус на ногах) – і навіть не дізнатися про це. Беручи до уваги пункт Б, ховатися і чекати марно – треба просто берегти тих, хто в групі ризику, особливо старанно;

– «італійський варіант» обійшов стороною інші країни, бо вони вчасно ввели всі обмеження.

Загалом, підбиваючи підсумок, можна сказати, що розрахунок швидше обнадіює. Повністю вірусу позбутися не вийде навіть за найжорсткіших заходів – але можна цілком успішно звести кількість випадків до одиниць на місяць.

4.5 Майбутні напрямки досліджень

Майбутні напрямки досліджень у галузі передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок" мають на меті постійне покращення і вдосконалення наших знань і методів. Деякі з можливих напрямків досліджень включають:

– врахування соціальних і поведінкових факторів: Дослідники можуть досліджувати вплив соціальних і поведінкових факторів на поширення хвороб та ідентифікувати їх взаємозв'язок з "гарячими точками" [33]. Розуміння соціальних мереж, мобільності населення, громадських звичок та інших факторів може допомогти вдосконалити моделі передбачення;

– використання нових джерел даних: Поява нових джерел даних, таких як мобільні дані, дані з датчиків та соціальних медіа, створює можливості для розширення наших даних та поліпшення моделей передбачення [34]. Використання цих даних у поєднанні з класичними епідеміологічними даними може дати більш повне уявлення про поширення хвороб та ідентифікацію "гарячих точок";

– урахування географічних особливостей: Географічні особливості мають важливе значення в епідеміології. Дослідження, спрямовані на вивчення впливу фізичного середовища, клімату, густоти населення та інших географічних чинників на поширення хвороб, можуть допомогти удосконалити прогнозування "гарячих точок" та адаптувати інтервенції до конкретних регіонів;

– використання машинного навчання та штучного інтелекту: Застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту може покращити ефективність епідеміологічних моделей [35]. Розвиток нових алгоритмів та підходів для автоматичної обробки та аналізу великих обсягів даних може допомогти виявити складні взаємозв'язки та шаблони, які сприяють передбаченню "гарячих точок";

– удосконалення передачі інформації та взаємодії: Розвиток технологій передачі інформації та засобів взаємодії дозволяє швидше та ефективніше реагувати на епідеміологічні загрози [36]. Дослідження, спрямовані на покращення систем сповіщення, моніторингу та комунікації, можуть забезпечити швидку обмін інформацією про "гарячі точки" та виконання необхідних заходів.

Ці напрямки досліджень мають на меті вдосконалення передбачення поширення епідемій та ідентифікації "гарячих точок" для ефективного управління епідемічними загрозами і підвищення громадського здоров'я.

ВИСНОВКИ

В даній роботі були розглянуті різні методи та підходи до розповсюдження епідемії для прогнозування найгарячіших точок.

Епідеміологічні моделі – це математичні інструменти, які використовуються для прогнозування поширення інфекційних захворювань і інформування про політику охорони здоров'я та стратегії втручання.

Існує кілька різних типів епідеміологічних моделей, включаючи моделі SIR, SIS і SEIR, які поділяють населення на різні групи на основі їх сприйнятливості до інфекції та статусу захворювання.

Ці моделі можна використовувати для прогнозування поширення епідемії та виявлення потенційних гарячих точок, але їх точність залежить від якості даних, використаних для створення моделей, і припущень, які лежать в основі моделі. Важливо розробити та оцінити епідеміологічні моделі, які можуть точно передбачити поширення епідемії та визначити потенційні гарячі точки, щоб отримати інформацію для прийняття рішень у сфері охорони здоров'я та запобігти подальшому поширенню хвороби.

В ході виконання даної роботи було розроблено програмний застосунок який є напівемпіричною моделлю, яка в умовах неповноти інформації може дати прогноз – у який бік може почати розвиватися ситуація, якщо фактор X збільшиться, а фактор Y зменшиться. Такі моделі досить грубим методом дозволяють виводити «з перших принципів» і дозволяють зрозуміти тенденцію, але не точну цифру тієї чи іншої події.

За основу було використано класичну модель поширення епідемії, до якої було внесено кілька факторів і припущень, специфічних для COVID-19.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Weiss H. H. The SIR model and the foundations of public health //Materials mathematics. – 2013. – С. 0001-17.
2. Luo W., Tay W. P. Finding an infection source under the SIS model //2013 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing. – IEEE, 2013. – С. 2930-2934.
3. Li M. Y., Muldowney J. S. Global stability for the SEIR model in epidemiology //Mathematical biosciences. – 1995. – Т. 125. – №. 2. – С. 155-164.
4. Green M. S. et al. When is an epidemic an epidemic? //The Israel Medical Association journal: IMAJ. – 2002. – Т. 4. – №. 1. – С. 3-6.
5. Morens D. M., Folkers G. K., Fauci A. S. What is a pandemic? //The Journal of infectious diseases. – 2009. – Т. 200. – №. 7. – С. 1018-1021.
6. Daley D. J., Gani J. Epidemic modelling: an introduction. – Cambridge University Press, 2001. – №. 15.
7. Horrox R. The black death //The Black Death. – Manchester University Press, 2013.
8. Gottfried R. S. Black death. – Simon and Schuster, 2010.
9. Thwaites G., Tavinor M., Gant V. The English sweating sickness, 1485 to 1551 //New England Journal of Medicine. – 1997. – Т. 336. – №. 8. – С. 580-582.
10. Morris Jr J. G., Black R. E. Cholera and other vibrioses in the United States //New England Journal of Medicine. – 1985. – Т. 312. – №. 6. – С. 343-350.
11. Bouron F. La grippe espagnole (1918-1919) dans les journaux français //Guerres mondiales et conflits contemporains. – 2009. – №. 1. – С. 83-91.
12. Вечур О. В., Васильєв А. Г. Реалізація програмної моделі розпізнавання зображення людини // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – Т. 4. – №. 2 (46). – С. 64-66.

13. Демченко І. Акценти ВООЗ щодо ключових характеристик систем охорони здоров'я: міжнародно-правові аспекти //Український часопис міжнародного права. – 2016. – №. 4. – С. 65-71.

14. Blakely D. E. Mass mediated disease: A case study analysis of three flu pandemics and public health policy. – Lexington Books, 2006.

15. Белоус Н. В. та ін. Про деякі методологічні аспекти побудови комп'ютерних навчальних систем // Радіоелектроніка і інформатика. – 1998. – №. 2 (3). – С. 130-133.

16. Sanmarchi F. et al. Exploring the gap between excess mortality and COVID-19 deaths in 67 countries //JAMA Network Open. – 2021. – Т. 4. – №. 7. – С. e2117359-e2117359.

17. Karlinsky A., Kobak D. Tracking excess mortality across countries during the COVID-19 pandemic with the World Mortality Dataset //Elife. – 2021. – Т. 10. – С. e69336.

18. Satsuma J. et al. Extending the SIR epidemic model //Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2004. – Т. 336. – №. 3-4. – С. 369-375.

19. Грищенко Т. Б., Етенко Н. Ю. Наукова бібліотека в інформаційно-освітньому просторі вищого навчального закладу. Аспекти інтегральної взаємодії. – 2011.

20. Shulgin B., Stone L., Agur Z. Pulse vaccination strategy in the SIR epidemic model //Bulletin of mathematical biology. – 1998. – Т. 60. – №. 6. – С. 1123-1148.

21. Кльонон І. Можливі сценарії розповсюдження COVID-19. Хабр. URL: <https://habr.com/ru/articles/493564/> (дата звернення: 24.04.2023).

22. Kabir K. M. A., Kuga K., Tanimoto J. Analysis of SIR epidemic model with information spreading of awareness //Chaos, Solitons & Fractals. – 2019. – Т. 119. – С. 118-125.

23. Beretta E., Takeuchi Y. Global stability of an SIR epidemic model with time delays //Journal of mathematical biology. – 1995. – Т. 33. – №. 3. – С. 250-260.

24. Zaman G., Kang Y. H., Jung I. H. Optimal treatment of an SIR epidemic model with time delay //BioSystems. – 2009. – Т. 98. – №. 1. – С. 43-50.

25. McCluskey C. C. Complete global stability for an SIR epidemic model with delay—distributed or discrete //Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2010. – Т. 11. – №. 1. – С. 55-59.

26. Stone L., Shulgin B., Agur Z. Theoretical examination of the pulse vaccination policy in the SIR epidemic model //Mathematical and computer modelling. – 2000. – Т. 31. – №. 4-5. – С. 207-215.

27. Hu Z., Ma W., Ruan S. Analysis of SIR epidemic models with nonlinear incidence rate and treatment //Mathematical biosciences. – 2012. – Т. 238. – №. 1. – С. 12-20.

28. Meng X., Chen L. The dynamics of a new SIR epidemic model concerning pulse vaccination strategy //Applied Mathematics and Computation. – 2008. – Т. 197. – №. 2. – С. 582-597.

29. Zhou L., Fan M. Dynamics of an SIR epidemic model with limited medical resources revisited //Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2012. – Т. 13. – №. 1. – С. 312-324.

30. Sene N. SIR epidemic model with Mittag–Leffler fractional derivative //Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. – Т. 137. – С. 109833.

31. Buonomo B., d’Onofrio A., Lacitignola D. Global stability of an SIR epidemic model with information dependent vaccination //Mathematical biosciences. – 2008. – Т. 216. – №. 1. – С. 9-16.

32. Enatsu Y., Nakata Y., Muroya Y. Global stability for a class of discrete SIR epidemic models //Math. Biosci. Eng. – 2010. – Т. 7. – №. 2. – С. 347-361.

33. Мамін П. О. МОДЕЛЬ ТА ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВІРУСІВ ЛЮДИНИ. – 2017.

34. Яблуновський О. В. Стохастичні моделі розповсюдження епідемій : дис. – КІІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.

35. Яблуновський О. В. Детерміністичні моделі розповсюдження епідемій : дис. – КІІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

36. Талалаєв К. О. Прогнозно-аналітичні дослідження—сучасний інструмент математичного моделювання закономірностей процесів розповсюдження

соціально небезпечних інфекційних захворювань в Причорноморському регіоні України. – 2019.