



Отримано: 20 вересня 2022 р.

Прорецензовано: 29 листопада 2022 р.

Прийнято до друку: 01 грудня 2022 р.

e-mail: leonid.havrylchyk@oa.edu.ua

DOI: 10.25264/2311-5149-2022-27(55)-89-95

Гаврильчик Л. С. Дослідження динаміки захворюваності на COVID-19 в Україні під час військового стану. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»* : науковий журнал. Острог : Вид-во НаУОА, грудень 2022. № 27(55). С. 89–95.

УДК: 519.7

JEL-класифікація: I11, I12, I18, C61

ORCID-ідентифікатор: <https://orcid.org/0000-0002-5570-1168>

Гаврильчик Леонід Сергійович,
аспірант напрямку прикладна математика
Національного університету «Острозька академія»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗАХВОРЮВАНOSTІ НА COVID-19 В УКРАЇНІ ПІД ЧАС ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ

COVID-19 серйозно вплинув на різні аспекти нашого життя, і першочергово включаючи саме здоров'я людей по всьому світу. Високий рівень передачі та поки відсутність ефективних терапевтичних засобів кинули виклик всьому людству. COVID-19 є інфекційною хворобою, яка вперше була виявлена в грудні 2019 р. в місті Ухань, Китай, після чого вірус швидко поширився на весь світ. Уже 30 січня 2020 р. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) оголосила спалах надзвичайною ситуацією у сфері громадського здоров'я інтернаціонального масштабу, а 11 березня 2020 р. – глобальною пандемією. У порівнянні з іншими гострими респіраторними захворюваннями, як-от: SARS або MERS, COVID-19 поширюється швидше завдяки посиленню процесам глобалізації.

Ключові слова: COVID-19, SIR-модель, пандемія, військовий стан.

Leonid Havrylchyk,
Postgraduate student of applied mathematics,
National University of Ostroh Academy

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE INCIDENCE OF COVID-19 IN UKRAINE DURING MARTIAL LAW

COVID-19 has seriously affected various aspects of our lives, and above all the health of people around the world. The high level of transmission and so far, the lack of effective therapeutic agents have challenged all mankind. COVID-19 is an infectious disease that was first detected in December 2019 in Wuhan, China, after which the virus quickly spread around the world. On January 30, 2020, the World Health Organization (WHO) declared an international public health emergency outbreak, and on March 11, 2020, a global pandemic. Compared to other acute respiratory diseases, such as SARS or MERS, COVID-19 is spreading faster due to increased globalization. According to reports of the first 40 cases of COVID-19, the majority of infected patients (73%) were males, and less than half (i.e., 32%) had comorbidities such as diabetes, hypertension, and cardiovascular diseases. It is also reported that the average age of patients was 49 years. The mortality rate in this group was almost 2%. In Ukraine, the first cases date back to March 3, 2020. Since the beginning of the epidemic in Ukraine, the average mortality rate was almost 3.5%, and the average age of patients was 41 years. On the night of February 24, 2022, after the Russian leader addressed his citizens, Russia launched a large-scale offensive on the territory of Ukraine. Martial law was declared by presidential decree at 05:30 on the same day throughout the controlled territory of Ukraine. Following the declaration of martial law, most businesses, food and entertainment establishments were forced to suspend operations due to the threat of airstrikes. Educational institutions of various levels were forced to close on vacation, and later open only for distance learning to prevent the accumulation of large masses of people in one place. As for the incidence statistics for COVID-19, at the beginning of the war, they didn't update at all or were limited updated. Therefore, it is now very important to know what the dynamics of the disease should be expected. To study these dynamics, we will use the SIR model, based on the results of which it will be possible to forecast what to expect from COVID-19.

Keywords: COVID-19, SIR model, pandemic, martial law.

Постановка проблеми. Згідно зі звітами про перші 40 випадків спалаху COVID-19 більшість інфікованих пацієнтів (а саме 73 %) були чоловіки, причому менше половини (тобто 32 %) мали супутні захворювання, такі як: цукровий діабет, гіпертонія, серцево-судинні захворювання. Також повідомляється, що середній вік хворих становив 49 років. Рівень смертності з цієї групи склав майже 2 % [3]. В Україні перші випадки захворювань датуються 3 березня 2020 р. З початку епідемії в Україні середній рівень смертності становив майже 3,5 %, а середній вік хворих – 41 рік.

У ніч на 24 лютого 2022 р., після звернення російського лідера до громадян, Росія почала широко-масштабний наступ на територію України. Указом Президента о 05:30 того ж дня на всій підконтрольній



території України оголошено воєнний стан. Після оголошення воєнного стану більшість підприємств, харчовальних та розважальних закладів були змушені призупинити свою діяльність через загрозу ракетних ударів. В свою чергу навчальні заклади різного рівня були змушені вийти на екстренні канікули, а згодом і взагалі вийти на дистанційне навчання, аби запобігти скупченню великої маси людей в одному місці. Якщо ж говорити про статистику захворюваності на COVID-19, то на початку війни вона перестала надходити взагалі або надходила в обмеженій кількості. Тому в цей час дуже важливо знати, на яку динаміку захворюваності варто очікувати. Отож, для дослідження в цій роботі буде використано SIR-модель, на основі результатів якої можна буде прогнозувати динаміку захворюваності на COVID-19 в найближчі місяці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З моменту виявлення COVID-19 найактивніше в цілому були залучені китайські вчені, оскільки перші спалахи COVID-19 почали з'являтися саме в місті Ухань. Серед них можна було б виділити Єцін Тонг, Зітін Ву, Кунь Лі, Лей Чжоу, Лінь Ян, Пейпей Ду, Пейхуа Цао, Пен Ву, Сюань Юй, Сюхуа Гуань, Сяоє Ван, Цзянь Чжуан, Ци Чжоу, Шу Ян та багато інших. Завдяки тісній співпраці вчених було досліджено динаміку захворюваності та смертності в Китаю.

Також в межах міжнародної співпраці були залучені спеціалісти з США, зокрема Б. Дж. Коулінг та Л. А. Мейерс, для дослідження швидкості зараження, з боку Китаю дослідженням цієї проблеми займались Чжанвей Ду, Сяоє Сюй, Є Ву та Лін Ван.

В Україні дослідженням та моделюванням динаміки захворюваності й впливом на неї сезонних чинників найбільше займалися А. Нікітін та І. Самойленко, а також в межах міжнародної співпраці українських та литовських університетів були залучені Є. Мейдуде-Кавалаяускене та С. Бекесіене.

Мета і завдання дослідження. Згідно з опитуваннями серед 7290 осіб у 8 європейських країнах середня кількість контактів на особу становила 13,4 з діапазоном від 7,95 (Німеччина) до 19,77 (Італія). Підлітки мали найвищий рівень контактів (18 осіб) у порівнянні з дорослими 20–60 (13 осіб) та літніми особами 60+ (8 осіб). При побудові моделі буде використаний саме європейський середній показник за замовчування [5].

Однак, слід зауважити, що середня кількість контактів в Україні може бути такою ж низькою, як в Німеччині (7,95) або ж такою високою, як в Італії (19,77), але навряд чи буде взагалі відрізнитись.

Важливість показника середньої кількості контактів в моделі полягає в тому, щоб наочно продемонструвати закон діючих мас, який, власне, припускає, що скупчення індивідів однорідні і кожен індивід приблизно однаково взаємодіє з кожним іншим індивідом.

Дослідження епідемії грипу 1918 р. показують, що запобіжні заходи зменшили передачу інфекції на 40 %. Закриття шкіл знизить рівень контактів на 50 % (оскільки це впливає на частину населення з найвищим рівнем контактів). Добровільний домашній карантин (інфікованої особи та всіх членів сім'ї) знизить рівень контактів на 35 %. Ізоляція лише інфікованих осіб (не членів сім'ї) приблизно знизить рівень контактів на 15 % [6].

Імовірність того, що хвороба справді передається, складає 2 %. Поточне значення було отримано шляхом порівняння показнику відтворення R_0 спільноти із нормальною кількістю контактів (1,4–3,9) і спільноти, яка знаходиться тривалий час ізольовано на круїзному судні, де спостерігається висока кількість контактів (14,8). Для порівняння, імовірність передачі H1N1, також відомого як «свинячий грип», була оцінена в 1,57 % [8].

Беручи до уваги звіти щодо 10 перших випадків, можна стверджувати, що середня тривалість інфікованості пацієнтів становила 7,5 днів. Остання ж оцінка серед 468 випадків складає від 3,68 до 4,75 днів [9]. Зовнішня оцінка у цих дослідженнях встановила, що середня тривалість інфікованості пацієнтів складає від 8,71 до 10,9, що свідчить про більш вірогідний діапазон в 9–11 днів. Нагадаємо, що рекомендована тривалість карантину для потенційно інфікованих складає 14 днів [10].

Серед 45 тис. підтверджених випадків COVID-19 у Китаю 13,8 % потребували госпіталізації, а 4,7 % потребували реанімаційної допомоги. Варто зазначити, що важкість перебігу COVID-19 тісно пов'язана з віком і частка населення, старшого за 65 років, в Китаю становила 11,9 %, в Україні ця частка складає 16,4 % [11].

Починаючи з 13 березня 2020 р., середня смертність серед хворих на COVID-19 в Україні складає 3,26 %. На момент 24 лютого 2022 р. кількість нових випадків захворювань на COVID-19 складала 27,5 тис., кількість тих, хто одужав від інфекційної хвороби, склала майже 35 тис. осіб.

У зв'язку з військовою агресією Російської Федерації проти України було введено воєнний стан по всій території нашої держави з подальшим його продовженням до 25 травня 2022 р. [13]. В результаті це призвело до переведення шкіл, ВНЗ та інших навчальних закладів на дистанційний формат навчання, що дозволяє нам припустити, що середня кількість контактів серед найактивнішої групи населення скоротилась на 50 %.



Отримуємо такі вхідні параметри для SIR-моделі:

Таблиця 1

Вхідні параметри SIR-моделі

Назва параметру	Опис	Числове значення
$S(t)$	Особи, сприйнятливі до захворювання	43466822
$I(t)$	Інфіковані особи	27538
$R(t)$	«Вилучені» особи	34987
Contact rate	Середня кількість контактів	6,4
Transmissibility	Імовірність зараження	2 %
β	Швидкість передачі захворювання	0,134
d	Тривалість інфікованості	10
γ	Швидкість одужання	0.1
% Needing Hospitalization	Особи, які потребують госпіталізації (у %)	13,80 %
% Needing ICU Care	Особи, які потребують реанімаційної допомоги (у %)	4,70 %
Mortality rate	Коефіцієнт смертності (на 1 млн)	3,26 %

Використовуючи вхідні параметри, побудуємо просту SIR-модель в табличному процесорі Microsoft Excel.

Виклад основного матеріалу. Модель SIR є класичною моделлю для вивчення поширення захворювань серед населення або ж певної групи. Модель можна модифікувати для того, щоб врахувати такі важливі фактори, як смертність, імміграція, народжуваність або навіть одужання та імунітет, але навіть базова модель може дати змогу змоделювати появу й поширення тієї чи іншої хвороби. У цій же статті буде розглядатись найпростіша модель.

Розглянемо просту епідемічну модель, де населення розділяють на класи в певний момент часу: особи, сприйнятливі до захворювання (**S** – *susceptible*), інфіковані особи (**I** – *infected*), і «вилучені» особи (**R** – *removed*). Клас «вилучені» враховує тих осіб, які не є інфікованими та не є сприйнятливими до захворювання; іншими словами, імунні особи, особи, які перебувають під карантинном, або померлі. В інших варіантах SIR-моделі цей клас може врахувати як постійний, так і тимчасовий імунітет, отриманий внаслідок вакцинації або захворювання. Однак, в спрощеній моделі імунітет (або відсутність сприйнятливості до захворювання) є постійним. Окремі особи можуть переходити з одного класу в інший; наприклад, особа може перейти з інфікованого класу до «вилученого» після відновлення. Таким чином, модель враховує взаємозалежність різних класів серед населення.

Базове рівняння SIR-моделі таке:

$$N = S(t) + I(t) + R(t) \quad (1)$$

де N – це загальна кількість населення, яке розглядається як константа; $S(t)$ – населення, сприятливе до захворювання; $I(t)$ – інфіковане населення; $R(t)$ – «вилучене» населення.

Для зображення темпу зміни трьох підкласів, які по суті компенсують один одного, використовується таке рівняння:

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0 \quad (2)$$

SIR-модель передбачає, що значна частина індивідів з населення дотримуються закону діючих мас, тобто вони вступають в контакт один з одним випадковим чином. Імовірність контакту інфікованої особи з іншими особами серед населення описується фіксованим параметром c . Імовірність того, що хвороба справді передається, описується параметром a . Помноживши a і c , ми можемо звести ці дві константи в одну – β (або ж r за іншими джерелами), яка вказуватиме на постійну швидкість передачі захворювання [4]. Однак важливо звернути увагу на окремі компоненти β , коли мова йде про поширення хвороби в цілому. Закон діючих мас передбачає, що передача захворювання залежить від чисельності населення. Сталу середню швидкість «одужання» за одиницю часу позначимо як γ (також σ за іншим джерелом) [4].

Таке припущення є справедливим для багатьох захворювань, таких як грип, винятком будуть тільки хвороби, що передаються статевим шляхом. Однак захворювання, які мають альтернативні схеми передачі, виходять за рамки базової моделі.

Зважаючи на твердження, наведене вище, побудуємо систему рівнянь:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta S(t)I(t) \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I(t) \quad (5)$$

Припустимо, що постійна швидкість передачі захворювання, β , і швидкість одужання, γ , є більшими за 0. А швидкість оновлення сприйнятливо до захворювання населення, $\frac{dS}{dt}$ за визначенням нижче 0, тобто негативна. Отже, максимальна кількість сприйнятливих осіб серед населення в момент часу 0 буде становити $S_{max} = S_0$.

Модель SIR є системою трьох нелінійних диференціальних рівнянь, тому її неможливо вирішити явно. Однак, систему можна розв'язати чисельно з різним ступенем точності, і цього більш ніж достатньо для розуміння моделі та використання її при проведенні різного роду запобіжних заходів.

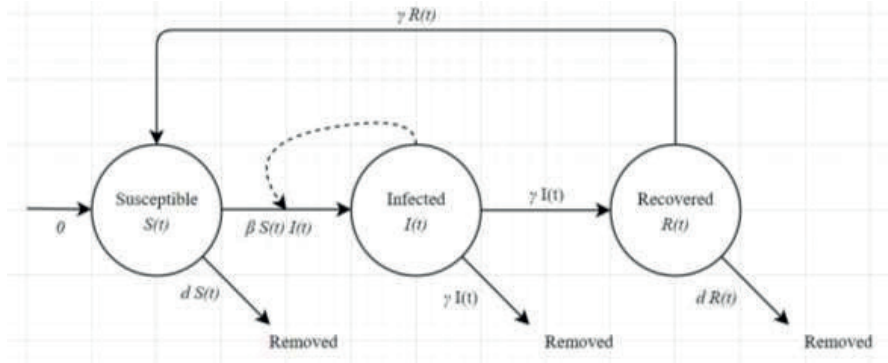


Рис. 1. Загальна схема SIR-моделі

Встановимо початкові умови. Нехай 0 буде визначено як момент початку потенційної епідемії. Припустимо, що кількість сприйнятливо й інфікованого населення більше ніж 0; інакше поширення хвороби було б неможливим. Також припустимо, що з початку епідемії імунітет до певної хвороби відсутній, відповідно ми можемо встановити значення для «вилученого» населення рівним 0 в момент 0.

$$S(0) = S_0 > 0, I(0) = I_0 > 0, R(0) = 0 \quad (6)$$

Знаючи значення β , γ , S_0 і I_0 , ми зможемо зрозуміти, чи поширюється інфекція, та дізнатися максимальну кількість інфікованих осіб, на яку ми можемо очікувати. Для того, щоб знайти швидкість зміни інфікованого населення в нульовий момент часу, ми підставляємо початкові значення в рівняння:

$$\frac{dI}{dt_{t=0}} = \beta S_0 I_0 - \gamma I_0 \quad (7)$$

Таким чином, можемо припустити, що швидкість зміни інфікованого населення в момент 0, складає більше 0, коли $\beta S_0 I_0 > \gamma I_0$, що можна відобразити так:

$$\beta S_0 I_0 > \gamma I_0 \quad (8)$$

$$\beta S_0 > \gamma \quad (9)$$

$$S_0 > \frac{\gamma}{\beta} \quad (10)$$

Виходячи з цього, ми можемо стверджувати, що швидкість зміни інфікованого населення буде додатньою (кількість інфікованих збільшиться), коли відносна швидкість «вилученого» населення (швидкість одужання γ над швидкістю зараження β) буде меншою, ніж початкова кількість сприйнятливих до захворювання S_0 . В цьому випадку хвороба буде поширюватися.

Коли відносна швидкість «вилучення» більша, ніж початкова кількість сприйнятливих до захворювання S_0 , тобто $\frac{dI}{dt_{t=0}} < 0$. То хвороба згасає і епідемія не настає.

Незважаючи на те, що SIR-модель була сформульована ще у 1927 р., донедавна для її розв'язку використовували лише чисельні методи. Проте у 2014 р. Т. Харко і його співавтори запропонували перший аналітичний розв'язок [18].

Диференціюємо рівняння (1) по t . Отримаємо:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{N}{\alpha} \left[\frac{S''}{S} - \left(\frac{S'}{S} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Тепер перетворимо рівняння (2):

$$\frac{S''}{S} = \left(\frac{S'}{S}\right)^2 - \beta \frac{S'}{S} + \frac{\alpha}{N} S' \quad (12)$$

Відповідно заберемо також I з рівняння (3):

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{N\beta}{\alpha} \left(\frac{S'}{S}\right) \quad (13)$$

(13) є простим диференціальним рівнянням першого порядку, розв'язком якого є:

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{N\beta} R\right) \quad (14)$$

де S_0 є константою інтегрування. Продиференціювавши це рівняння, отримаємо:

$$S' = -\frac{S_0\alpha}{N\beta} R' \exp\left(-\frac{\alpha}{N\beta} R\right) \quad (15)$$

Далі диференціюємо рівняння (13) і замінюємо значення S :

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{S_0\alpha}{N} \frac{dR}{dt} \left(-\frac{\alpha}{N\beta} R\right) - \beta \frac{dR}{dt} \quad (16)$$

Проведемо також наступні заміни:

$$\exp(-\alpha/N\beta R(t)) \equiv u(t) \quad (17)$$

$$u'(t) \left(\beta - \frac{\alpha S_0 u(t)}{N}\right) + u''(t) = \frac{u'(t)^2}{u(t)} \quad (18)$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{u'(t)}; \quad \frac{d}{dt} u'(t) = -\frac{\varphi'(u)}{\varphi(u)^3} \quad (19)$$

Отримаємо в результаті диференціальне рівняння Бернуллі:

$$\varphi'(u) = \varphi(u) \left(\varphi(u) \left(\beta - \frac{\alpha S_0 u}{N}\right) - \frac{1}{u}\right) \quad (20)$$

загальним розв'язком якого є:

$$\frac{d}{dt} = \varphi(u) \rightarrow \frac{N}{u(c_1 N - \beta N \log(u) + \alpha S_0 u)} \quad (21)$$

$$t(u) - t_0 = \int_0^u \frac{N}{s(c_1 N - \beta N \log(s) + \alpha S_0 s)} ds \quad (22)$$

З цього розв'язку можна зробити деякі висновки про часову залежність моделі. Та, незважаючи на це, такий розв'язок залишається корисним лише в рамках академічної цікавості, оскільки його складно узагальнити для використання в комп'ютерних обчисленнях.

Орієнтуючись на історичні дані та результати моделі з даними за 1 січня 2022 р., можна стверджувати, що модель має відхилення, оскільки не було враховано дані про вакциновану частину населення та дані про частину населення з набутим імунітетом. Також не були враховані запроваджені урядом запобіжні заходи. Окрім цього, орієнтуючись на історичні дані, можна зазначити, що середній приріст нових випадків захворювань на COVID-19 становив 6,98 %, а середній приріст нових смертей від інфекційної хвороби – 11,41 %.

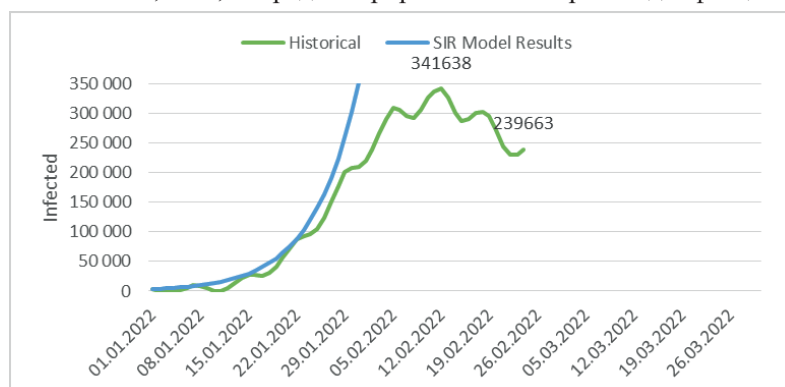


Рис. 2. Порівняння кількості інфікованих між результатами SIR-моделі та історичними даними від 01.01.2022

Побудувавши модель з останніми доступними даними в Україні, а саме з даними за 24 лютого 2022 р., можна стверджувати, що без фармакологічного втручання та при наявних запобіжних заходах слід очікувати спад кількості сприйнятливого до захворювання населення та зростання «вилученої» частини населення до кінця поточного року при умові, що запобіжні заходи для активної групи населення залишаться до 1 вересня 2022 р. Варто зазначити, що можливий приріст інфікованих слід очікувати двома хвилями, зокрема в такі періоди: з початку квітня та до кінця травня; з кінця вересня та до початку грудня. При наявних умовах максимальна кількість інфікованих може сягнути майже 180 тис. в першу хвилю та 165 тис. в другу хвилю.

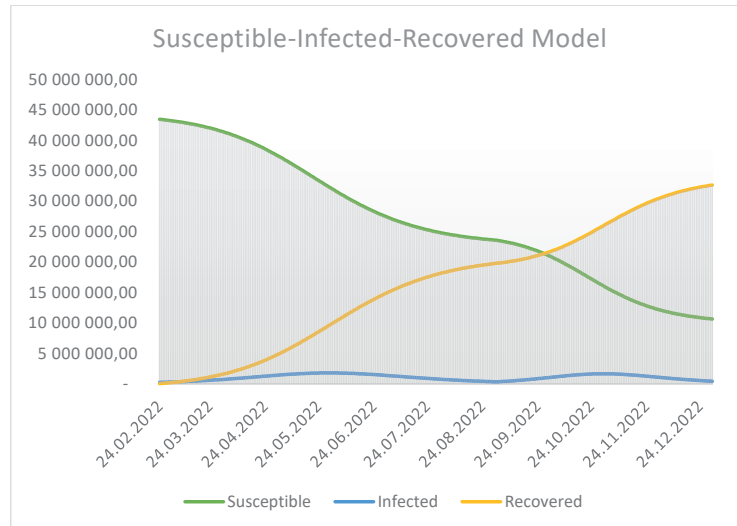


Рис. 3. Результати SIR-моделі з вхідними даними від 24.02.2022

Необхідно додати, що можливий приріст інфікованих під час двох спалахів інфекції вплине на збільшення кількості госпіталізованих з COVID-19, серед яких майже 3 % потребуватимуть реанімаційної допомоги в середньому. Зазначимо, що середня кількість смертей за рік від інфекції становитиме 0,26 %.

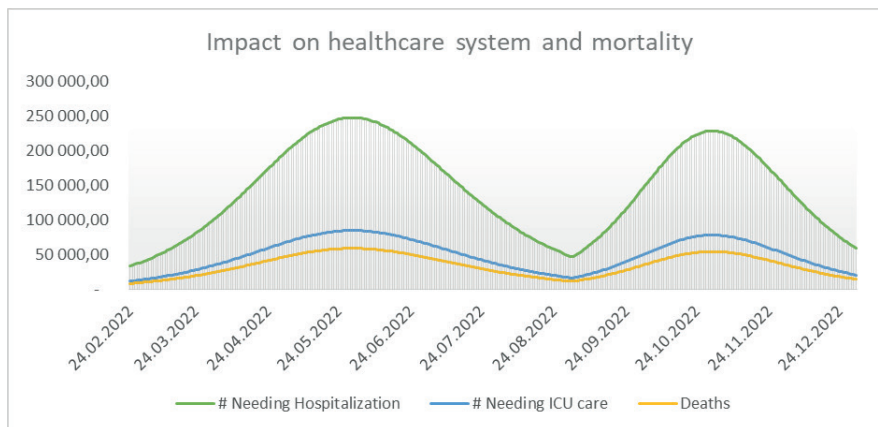


Рис. 4. Результати SIR-моделі з вхідними даними від 24.02.2022, які демонструють вплив на систему охорони здоров'я та смертність

Висновки. Побудувавши SIR-модель та провівши аналіз її результатів, ми можемо стверджувати, що модель дозволяє описати спалах епідемії й досягнення її пікового значення. Зокрема, спираючись на результати моделі, можна зазначити що в 2022 р. слід очікувати дві хвилі спалахів, де максимальна кількість хворих може сягати від 165 тис. до 180 тис. Окремо слід зазначити, що поточна модель містить похибку у зв'язку з тим, що не було враховано частку населення з набутим імунітетом, вакциновану частку населення та міграційні процеси, які значно зросли з початку війни. Тому очікувана кількість хворих може бути значно меншою або при посиленні міграційних процесів значно більшою, ніж було прогнозовано.

Ефективним заходом для зниження епідемічного процесу, що впливає на характер кривих на рис. 2–4 і результати SIR-моделі, залишається дотримання запобіжних й карантинних заходів та продов-



ження активної вакцинації в умовах воєнного стану, оскільки це посприятиме зменшенню ризику спалахів COVID-19.

Література:

- Burhan, E., Prasenhadi, P., Rogayah, R., Isbaniyah, F., Reisa, T., & Dharmawan, I. (2020). Clinical progression of COVID-19 patient with extended incubation period, delayed RT-PCR time-to-positivity, and potential role of chest CT-scan. *Acta Med Indones.* № 52(1), 80-83.
- Yang, S., Cao, P., Du, P., Wu, Z., Zhuang, Z., Yang, L., Yu, X., Zhou, Q., Feng, X., Wang, X., Li, W., Liu, E., Chen, J., Chen, Y., & He, D. (2020). Early estimation of the case fatality rate of COVID-19 in mainland China: A data-driven analysis. *Annals of Translational Medicine*, № 8(4), 128. <<https://doi.org/10.21037/atm.2020.02.66>> (1 December 2022)
- Hailu, G., Tilahun, T., Tadesse, G., Bitew, D., Angaw, K., Mengistie, C., Asrat, A., Ambaw, F., Gelaw, Y., Degu, G., & Kebede, E. (2021). Epidemiologic modeling of COVID-19 in Amhara region, Ethiopia: Using the best and worst scenarios experienced in the world. *Research Square* <<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-190422/v1>> (1 December 2022)
- Alger, C., & Todd, K. The SIR model of disease spread. *Simmons University Academic Journal*. <http://web.simmons.edu/~grigorya/390/projects/Charlotte-Kaitlin_Epidemics.pdf> (1 December 2022)
- Mossong, J., Hens, N., Jit, M., Beutels, P., Auranen, K., Mikolajczyk, R., Massari, M., Salmaso, S., Tomba, G. S., Wallinga, J., Heijne, J., Sadkowska-Todys, M., Rosinska, M., & Edmunds, W. J. (2008). Social contacts and mixing patterns relevant to the spread of infectious diseases. *PLoS Medicine*, № 5(3), 74. <<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050074>> (1 December 2022)
- Bootsma, M. C. J., & Ferguson, N. M. (2007). The effect of public health measures on the 1918 influenza pandemic in U.S. cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, № 104(18), 7588–7593. <<https://doi.org/10.1073/pnas.0611071104>> (1 December 2022)
- Rocklöv, J., Sjödin, H., & Wilder-Smith, A. (2020). COVID-19 outbreak on the diamond princess cruise ship: Estimating the epidemic potential and effectiveness of public health countermeasures. *Journal of Travel Medicine*, № 27(3), 1-30. <<https://doi.org/10.1093/jtm/taaa030>> (1 December 2022)
- Riley, P., Ben-Nun, M., Armenta, R., Linker, J. A., Eick, A. A., Sanchez, J. L., George, D., Bacon, D. P., & Riley, S. (2013). Multiple estimates of transmissibility for the 2009 influenza pandemic based on Influenza-like-Illness data from small US military populations. *PLoS Computational Biology*, № 9(5), 1003064. <<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003064>> (1 December 2022)
- Li, Q., Guan, X., Wu, P., Wang, X., Zhou, L., Tong, Y., Ren, R., Leung, K. S., Lau, E. H., Wong, J. Y., Xing, X., Xiang, N., Wu, Y., Li, C., Chen, Q., Li, D., Liu, T., Zhao, J., Liu, M.,... Feng, Z. (2020). Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel Coronavirus-Infected pneumonia. *New England Journal of Medicine*, № 382(13), 1199–1207. <<https://doi.org/10.1056/nejmoa2001316>> (1 December 2022)
- Du, Z., Xu, X., Wu, Y., Wang, L., Cowling, B. J., & Meyers, L. A. (2020). Serial interval of COVID-19 among publicly reported confirmed cases. *Emerging Infectious Diseases*, № 26(6), 1341–1343. <<https://doi.org/10.3201/eid2606.200357>> (1 December 2022)
- Nesteruk, I., Rodionov, O., Nikitin, A., & Walczak, S. (2022, April 22). Influences of seasonal and demographic factors on the COVID-19 pandemic dynamics. *EAI Endorsed Transactions on Bioengineering and Bioinformatics*, № 1(4), 172364. <<https://doi.org/10.4108/eai.8-12-2021.172364>> (1 December 2022)
- Bekesiene, S., Samoilenko, I., Nikitin, A., & Meidute-Kavaliauskiene, I. (2022, February 9). *The Complex Systems for Conflict Interaction Modelling to Describe a Non-Trivial Epidemiological Situation. Mathematics*, № 10(4), 537. <<https://doi.org/10.3390/math10040537>> (1 December 2022)
- The Novel Coronavirus Pneumonia Emergency Response Epidemiology Team. (2020). The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19). *China CDC Wkly.* №2(8), 113-122. <<http://dx.doi.org/10.46234/ccdcw2020.032>> (1 December 2022)
- Указ Президента України №64/2022. Офіційне інтернет-представництво президента України. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/642022-41397> (дата звернення: 01.12.2022).
- UKAZ PREZYDENTA UKRAINY №64/2022. Ofitsiine internet-predstavnytstvo prezydenta Ukrainy [DECREE OF THE PRESIDENT OF UKRAINE No. 64/2022. Official online representation of the President of Ukraine] <<https://www.president.gov.ua/documents/642022-41397>> (1 December 2022) [in Ukrainian]
- Про затвердження Указу Президента України «Про продовження строку дії воєнного стану в Україні». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2212-IX#Text> (дата звернення: 01.12.2022).
- Pro zatverdzhennia Ukazu Prezydenta Ukrainy "Pro prodovzhennia stroku dii voiennoho stanu v Ukraini" [On the approval of the Decree of the President of Ukraine "On extending the period of martial law in Ukraine"] <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2212-IX#Text>> (1 December 2022) [in Ukrainian]
- Hoyt, A., COVID-19 SIR Model. <<https://onedrive.live.com/view.aspx?resid=1E0B3E49BE9E6828!70430&i=thint=file%2cxlsx&authkey=!ACcYayKvUyplrds>> (1 December 2022)
- Ritchie, H. Coronavirus Pandemic (COVID-19). *Our World in Data*. <<https://ourworldindata.org/coronavirus>> (1 December 2022)
- Harko, T., Lobo, F. S., & Mak, M. (2014, June). Exact analytical solutions of the Susceptible-Infected-Recovered (SIR) epidemic model and of the SIR model with equal death and birth rates. *Applied Mathematics and Computation*, № 236, 184–194. <<https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.03.030>> (1 December 2022)