

**Робоча група з математичного моделювання проблем, пов'язаних з епідемією  
коронавірусу SARS-CoV-2 в Україні,  
базова установа –  
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України**

Створена Розпорядженням Президії НАН України від 3 квітня 2020 р. № 118

**Прогноз  
розвитку епідемії COVID-19 в Україні в період  
13 травня – 13 червня 2020 р.  
“Прогноз РГ-5”**

**13.05.2020**

З початку квітня 2020 р. міжвідомча Робоча група (РГ) представників НАН України, КНУ імені Тараса Шевченка та НАМН України – з урахуванням світового досвіду математичного моделювання розвитку епідемії COVID-19 і на основі статистичних даних про динаміку епідемії в Україні та країнах Європи – створювала і тестувала математичну модель SEIR–U. За результатами проведеного моделювання Робоча група підготувала документи “Прогноз розвитку епідемії коронавірусу SARS-CoV-2 в Україні»:

РГ1 від 13 квітня 2020 р.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=6346>

РГ2 від 21 квітня 2020 р.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=6362>

РГ3 від 27 квітня 2020 р.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=6391>

РГ4 від 5 травня 2020 р.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=6431>

Президія НАН України офіційно представила прогнози до державних органів. Посилання на ці прогнози надавав Кабінет Міністрів України під час брифінгів.

У новому документі «Прогноз РГ-5»:

- здійснено аналіз останніх статистичних даних розвитку епідемії в Україні та кількох європейських країнах;
- проведено порівняльний аналіз результатів попередніх прогнозів;
- представлено прогноз розвитку епідемії на наступний період 13 травня – 13 червня 2020 р.

РГ продовжує роботи з удосконалення моделі SEIR–U, короткий опис якої надано в документі «Прогноз-РГ1», а більш детальний – у звітах Робочої групи.

## 1. Статистичні особливості розвитку пандемії COVID-19 у кількох країнах.

Головні тренди розвитку пандемії у кількох країнах представлено на рис.1.

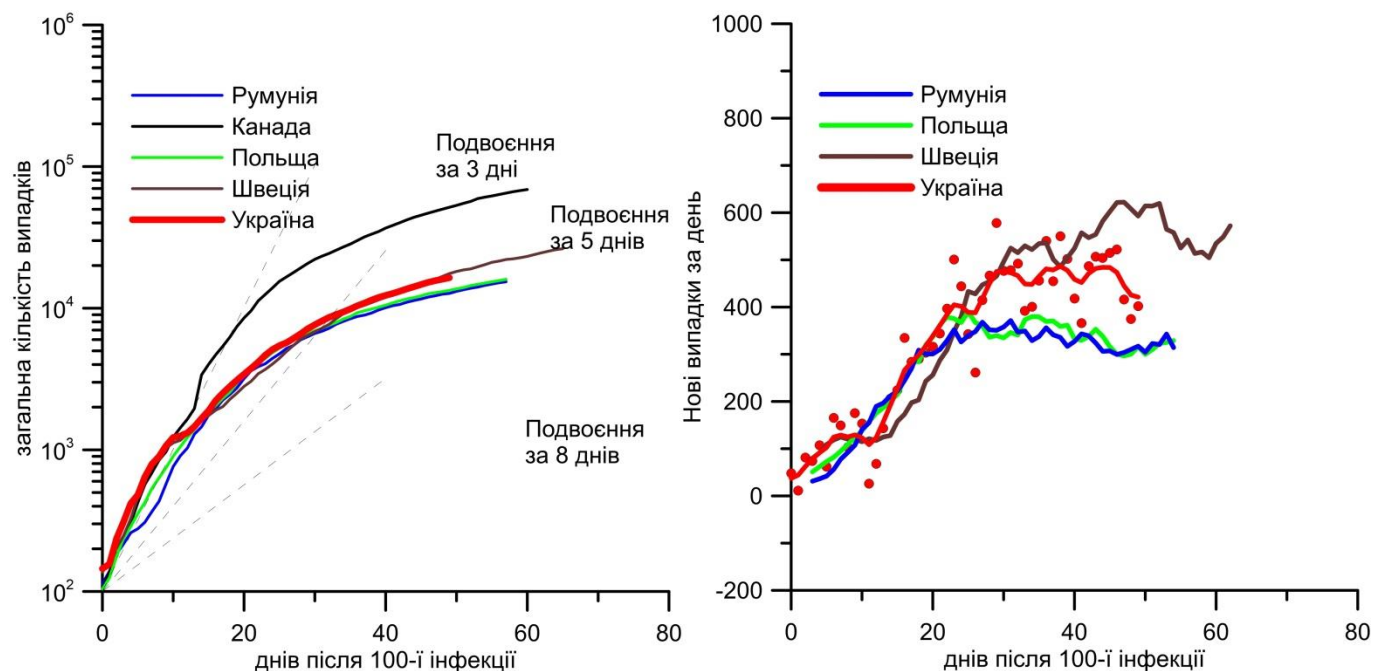


Рис.1. Сумарна кількість виявлених випадків захворювання (ліворуч) і кількість захворювань, виявлених за день (праворуч). Щоденну кількість нових випадків подано згладженою з методом зваженого рухомого середнього з вікном осереднення 9 днів. Червоними точками показано не згладжені дані для України

На рис.1 першим днем епідемії в кожній країні вважається день, коли сумарна кількість виявлених інфікованих перевищила 100 випадків виявлених захворювань у країні. Для України цією датою є 25 березня. Для порівняння обрано країни, в яких динаміка росту кількості інфікованих схожа на українську.

Виходячи з графіків рис.1, можна побачити, що останні три тижні епідемія в Україні перебуває у фазі плато з помітними коливаннями з тижневим періодом. Різні методи рухомого осереднення (з вікном 5, 7 або 9 днів) дають три явні послідовні максимуми, що припадають на п'ятницю-суботу, та мінімуми, що припадають на понеділок-вівторок. Залежно від методу осереднення, абсолютний максимум відбувся 2 або 8 травня. Максимуми 2 та 8 травня мають майже рівні амплітуди, тому доцільно вважати, що пік виявлення нових випадків припав на період 2-8 травня.

За останній тиждень період подвоєння (нахил кривої) для України збільшився з 13 днів до близько 18 днів, що також свідчить про настання фази лінійного росту, та має тенденцію до збільшення (більш полого крива).

Іншим важливим показником фази розвитку епідемії є кількість нових активних інфікованих за день, тобто різниця між новими інфікованими та тими, хто вже одужав.

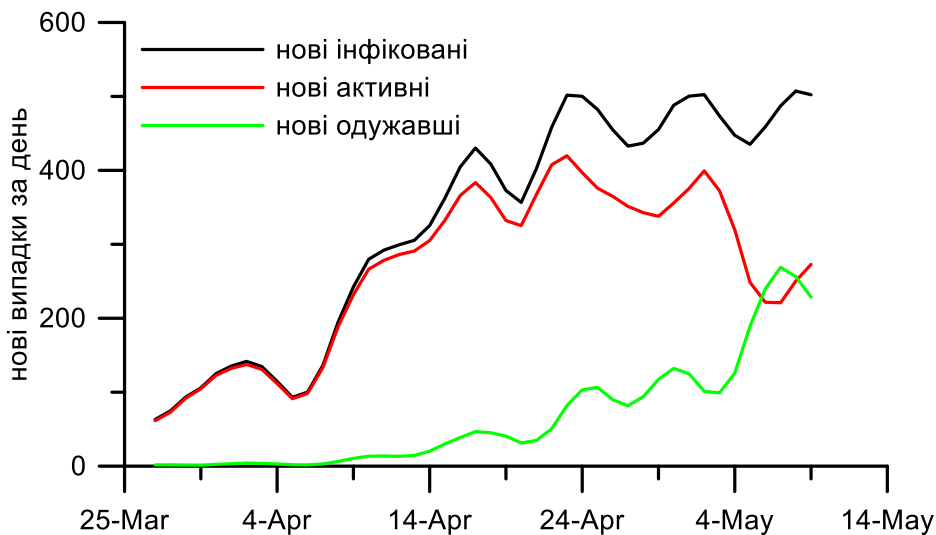


Рис.2. Кількість нових зареєстрованих випадків за день, кількість осіб, що одужали за день, та кількість нових активних інфікованих. Для відображення використовувалося зважене рухоме середнє з вікном 5 днів

З рис.2 видно, що за кількістю нових активних (тих, хто не одужав) інфікованих пік є значно більш виразним і настав ще в період 24 квітня – 2 травня. Графік кількості тих, хто одужав, також демонструє періодичні (тижневі) коливання та стабільно зростає.

Для оцінки впливу різних стратегій карантинних заходів на розвиток епідемії розглянемо календарний хід епідемії в Україні, Швеції, Польщі, Канаді як країні, близькій до України за кількістю населення, та Республіці Білорусь і Російській Федерації, в яких не було оголошено режиму стану національного карантину.

Як і в попередніх документах Робочої групи, для оцінки календарної динаміки й інтенсивності карантинних заходів використовувалися дані про мобільність населення у різних країнах за даними фірми Apple.

Результати, представлені на рис.3, яскраво демонструють, що в Канаді – країні з кількістю населення, приблизно рівною Україні без окупованих територій, – зменшення мобільності за рахунок карантинних заходів розпочалося лише тоді, коли щоденна кількість нових захворювань перевищила 100 випадків на день. Це призвело в Канаді до пікової кількості нових інфікованих – у 5-8 разів більшої, ніж в Україні і Польщі, в яких карантинні заходи різко зменшили мобільність населення, коли лише з'явилися перші випадки інфікованих у цих країнах.

Apple не надає відомостей про мобільність населення у Республіці Білорусь. Відомо, що повний карантин не було оголошено в цій країні і, відповідно, статистичні дані демонструють значно швидше наростання розповсюдження епідемії в Білорусі, ніж у сусідніх країнах. Це особливо яскраво видно на рис.3б, на якому представлено рухомі осереднені значення щоденної кількості нових інфікованих на 1 мільйон населення країни.

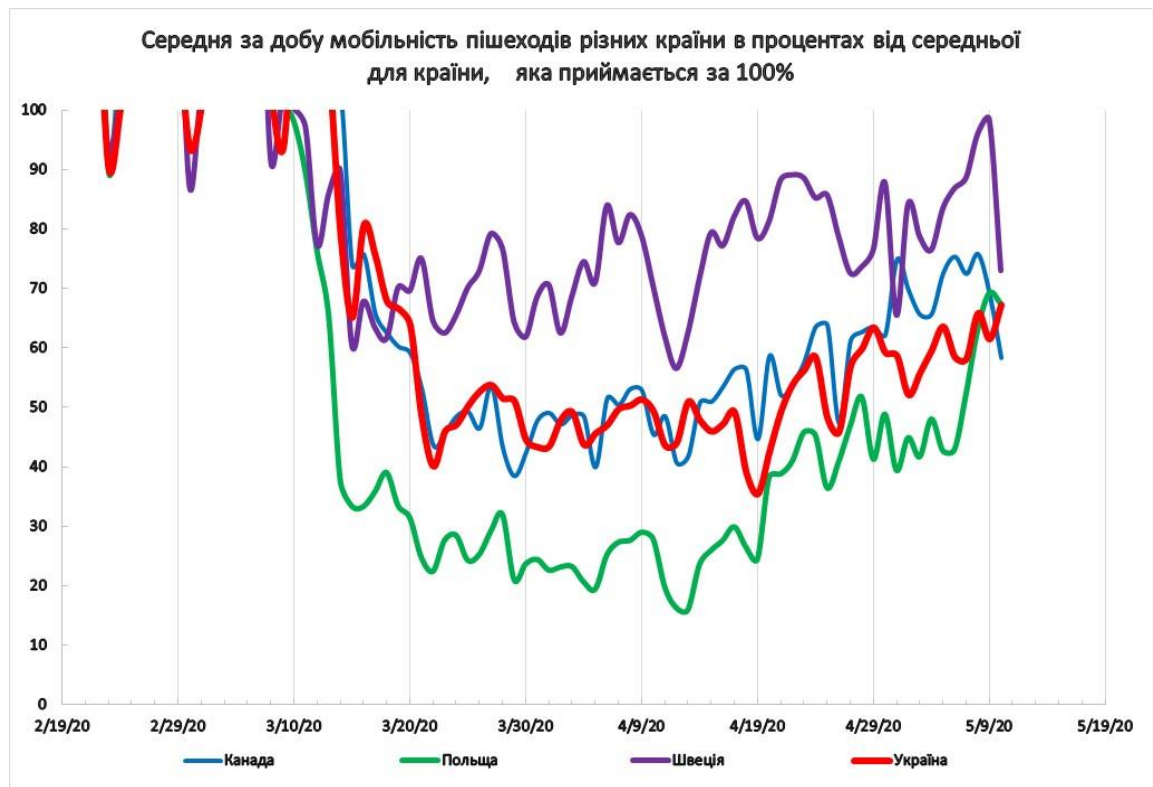
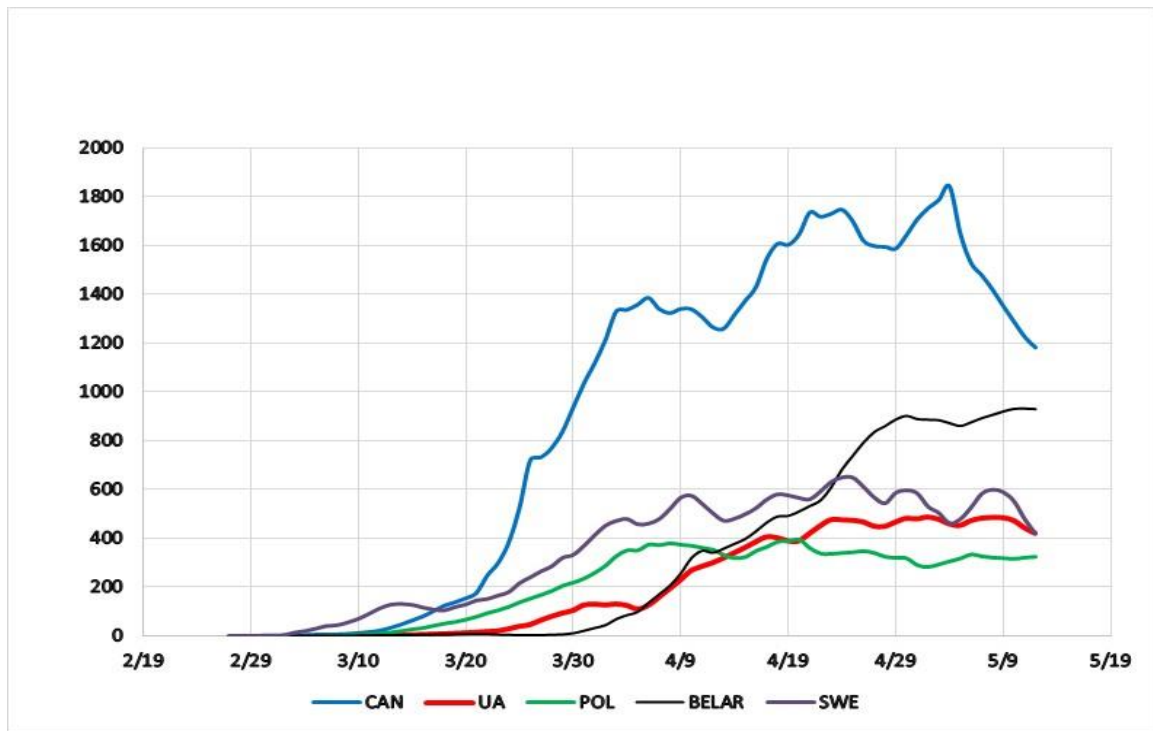


Рис.3а. Криві щодобових нових інфекцій в Україні, Польщі, Швеції, Канаді та Республіці Білорусь – 9-денне рухоме середнє (верхній рисунок) у порівнянні з мобільністю пішоходів з айфонами в кожній країні <https://www.apple.com/covid19/mobility> (нижній рисунок)

Особливо яскраво роль впровадження, точніше невпровадження, карантину в сусідніх з Україною країнах видно на рис.3б, на якому представлено кількість інфікованих на день, віднесено до 1 мільйона населення країни.

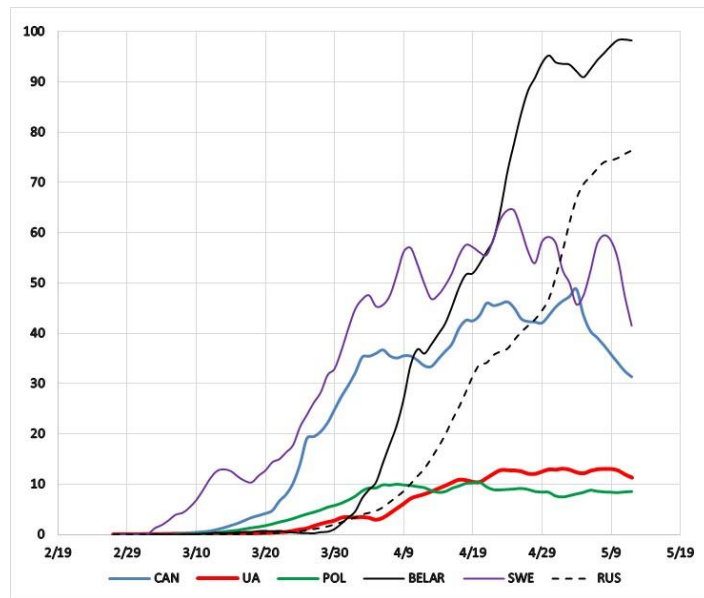


Рис.3б. Криві щодобових нових інфекцій в Україні, Польщі, Швеції, Канаді, Республіці Білорусь і Російській Федерації (9-денне рухоме середнє), віднесені до 1 млн населення кожної країни

За цим показником Республіка Білорусь значно випереджає сусідні країни, а за тенденцією розвитку епідемії, як і Російська Федерація, продовжує зростання. У Швеції – з «м'якими» карантинними заходами і, відповідно, значно меншим зменшеннями мобільності населення, ніж у Польщі й Україні, – кількість інфікованих на день у півтора-два рази більша, ніж в Україні та Польщі.

Графіки на рис.3а і рис.3б з урахуванням тенденції до зростання мобільності, а, отже, й інтенсивності контактності населення України з кінця квітня (рис.3а), демонструють високі ризики швидкого виходу з карантину в Україні.

Важливу нову кількісну характеристику контактності населення в умовах впровадження карантину в Україні нещодавно запропоновано командою проєкту «Рейтинг» на вебресурсі «Економіка карантину»: <https://q.rating.zone/>. Це «Індекс самоізоляції», який розраховується як відношення кількості клієнтів банку, які робили покупки у торгових точках на день, порівняно з таким самим днем тижня до карантину. Дані з динаміки цього індексу для Києва та у середньому для всіх обласних центрів України наведено на рис.3в.

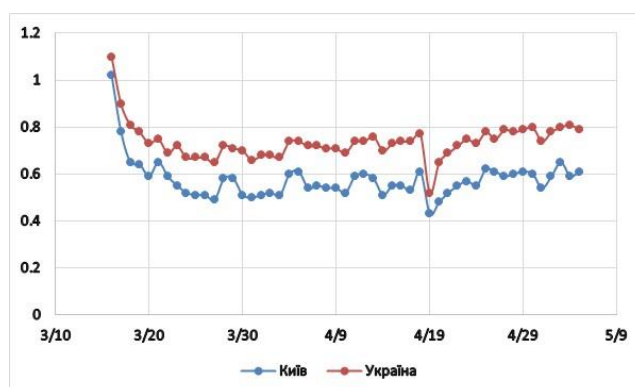


Рис.3в. «Індекс самоізоляції» для м. Києва й у середньому в обласних містах України, розрахований за даними, наданими вебресурсом «Економіка карантину»

Ці дані Індексу самоізоляції проєкту «Рейтинг», як і дані індексу мобільності Apple, демонструють підвищення соціальної активності населення з кінця квітня та меншу контактність населення Києва в період карантину у порівнянні з середньою по обласних містах України. Індекс демонструє і різке зниження візитів населення за покупками на Великдень. Індекс «Рейтинга» і дозволить кількісно оцінювати ступінь підвищення контактності населення на наступних етапах виходу з карантину.

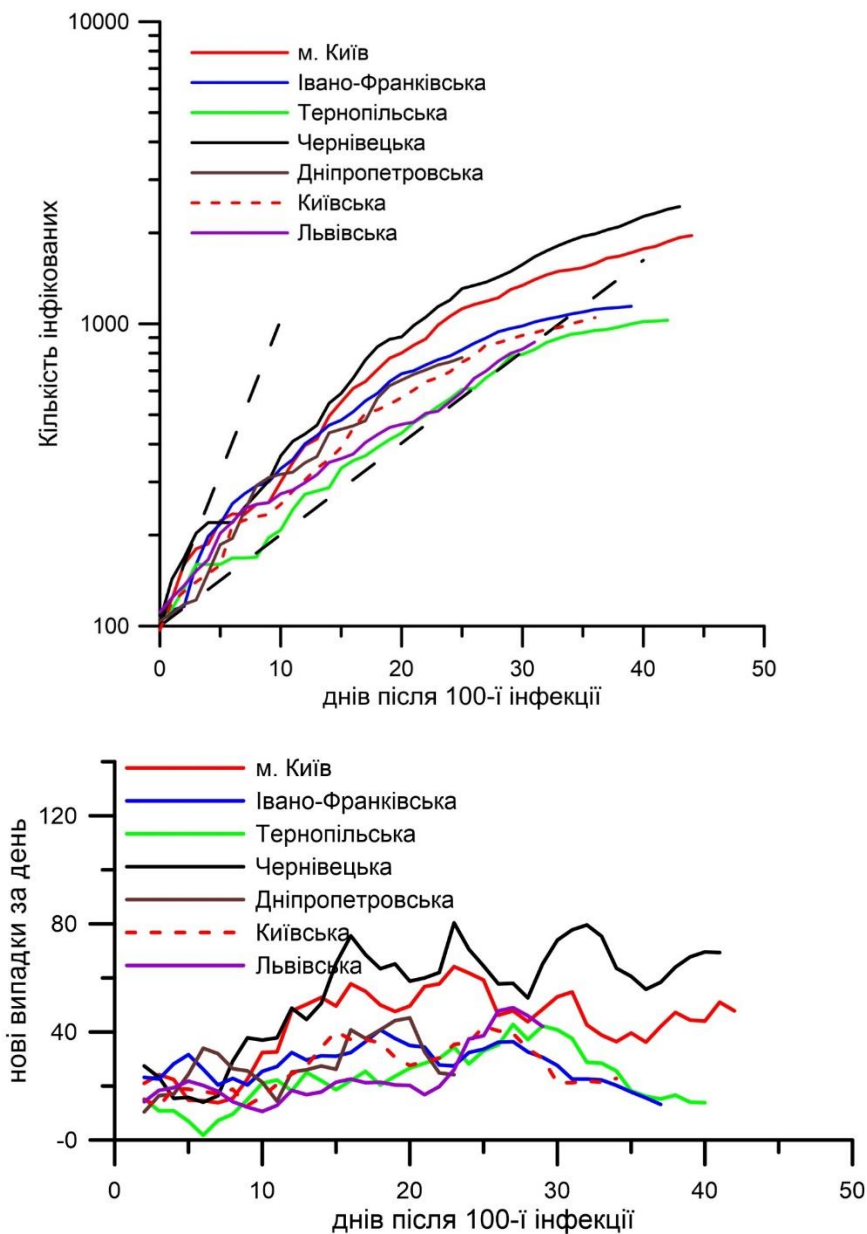


Рис.4. Загальна кількість інфікованих по найбільш заражених регіонах України (вгорі), кількість нових зареєстрованих випадків за день, згладжені дані (внизу). Дані наведено до дати виявленої 100-ї інфекції в кожному регіоні

Дані для кількох найбільш інфікованих регіонів України демонструють, що швидкість розповсюдження епідемії продовжує знижуватися (рис.4). Для м. Києва період подвоєння на поточний момент становить близько 20 днів, для Івано-Франківської області – 21 день, для Чернівецької та Тернопільської – близько 17-18 днів, для Дніпропетровської – 11 днів, для Київської – 15 днів, для Львівської – 12 днів. Графік кількості нових випадків за день демонструє, що в м. Києві



продовжується незначне зниження кількості нових випадків, Івано-Франківська, Київська, Дніпропетровська та Тернопільська області мають впевнене зниження, Львівська область зростає протягом останнього тижня, а найбільш уражена Чернівецька область ще перебуває на стадії плато.

## 2. Порівняння попередніх прогнозів розвитку епідемії в Україні зі статистичними даними.

Попередні прогнози кількості нових зареєстрованих випадків і нових летальних випадків було надано Робочою групою до державних органів і опубліковано на офіційному вебсайті НАН України 13.04, 20.04, 27.04 та 05.05 (документи РГ1 – РГ4). На рис.5 і рис.6 показано порівняння медіанних прогнозних кривих зі згладженими статистичними даними.

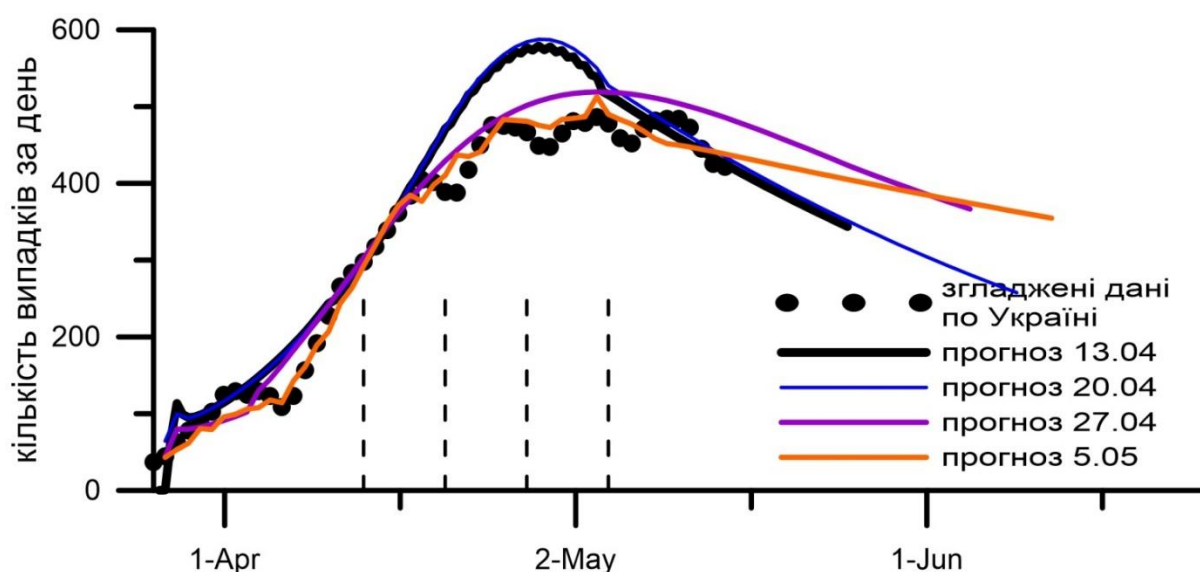


Рис. 5. Порівняння кількості нових інфікованих за день із медіанними прогнозними кривими документів «Прогноз РГ-1», «Прогноз РГ-2», «Прогноз РГ-3» та «Прогноз РГ-4». Статистичні дані показано згладженими методом зваженого рухомого середнього з вікном 9 днів. Дати надання прогнозів позначено штрихованими прямими

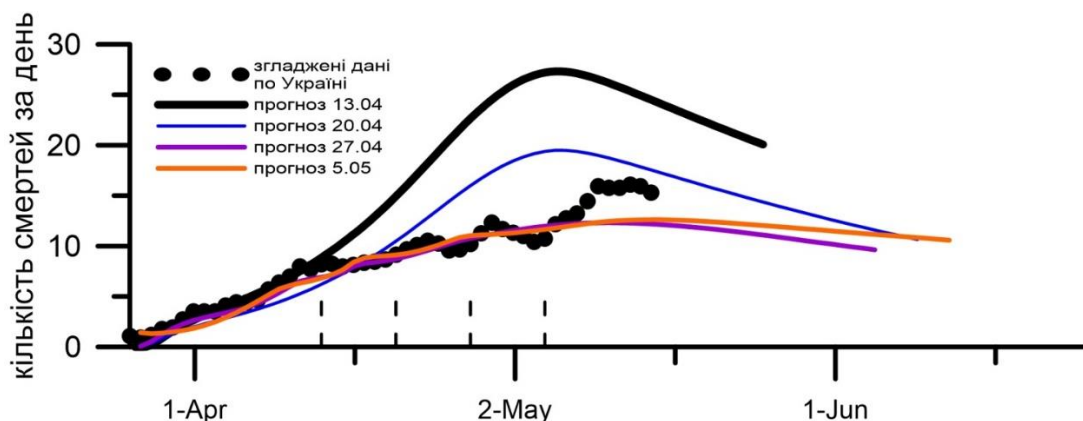


Рис. 6. Порівняння кількості нових летальних випадків за день із медіанними прогнозними кривими документів «Прогноз РГ-1», «Прогноз РГ-2», «Прогноз РГ-3» та «Прогноз РГ-4». Статистичні дані показано згладженими методом зваженого рухомого середнього з вікном 9 днів. Дати надання прогнозів позначено штрихованими прямими

З порівняння прогнозних кривих із фактичними даними видно, що прогнози оновлювались у бік зменшення амплітуди максимальних значень і більш пологого проходження піку. Прогнози щодо кількості смертей у прогнозах від 13.04, 20.04 та 27.04 виявилися завищеними, тоді як прогноз від 05.05 дав занижену оцінку летальності. Зміну в часі коефіцієнту летальності було оцінено та враховано при побудові нового прогнозу.

Результати проведеного порівняння (рис.5 і рис.6) демонструють, що станом на середину травня висновки Прогнозу РГ1 від 13 квітня 2020 року (**«Пік нових випадків COVID-19 на день буде припадати на 2- 5 травня 2020 р., пік летальних випадків – на 3-8 травня 2020 р. <...> Після досягнення піку захворюваності зниження нових випадків інфікованих буде спостерігатися до кінця травня 2020 р. до медіанного значення 400 випадків (діапазон прогнозованих значень 200-700)»**) виправдалися з досить високою точністю, якщо врахувати велику кількість факторів невизначеності такого моделювання.

### **3. Прогноз розвитку епідемії в Україні на 13 травня – 13 червня 2020 р.**

Ефективний коефіцієнт розвитку епідемії  $R_{oeff}$  розраховувався обробкою статистичних даних розвитку епідемії в Україні (нахилом кривої зростання випадків, періодами подвоєння з залученням також даних закордонних оцінок для України та прямих вимірів мобільності населення). У прогнозі РГ-5 було застосовано алгоритм визначення ефективного коефіцієнту репродукції за статистичними даними та параметрами математичної моделі. Для оцінки параметрів моделі було використано статистичні дані, надані ЦГЗ МОЗ на момент часу 4 травня 2020 року. Параметри моделі уточнювалися також за наведеними у попередньому розділі результатами порівняння прогнозів документу «Прогноз РГ-4» з виявленою кількістю нових інфікованих і померлих.

За статистичними даними ЦГЗ МОЗ було оцінено розподіл часу настання смерті як період від дати реєстрації випадку. Було виявлено, що середній проміжок часу між датою реєстрації та датою смерті складає 4,5 дні, тоді як середній інтервал часу від настання симптомів до смерті в середньому становить близько 14 днів. Ця різниця пояснюється затримкою в часі між настанням симптомів і потраплянням до офіційної статистики. На рис.7 показано розподіл цих періодів.



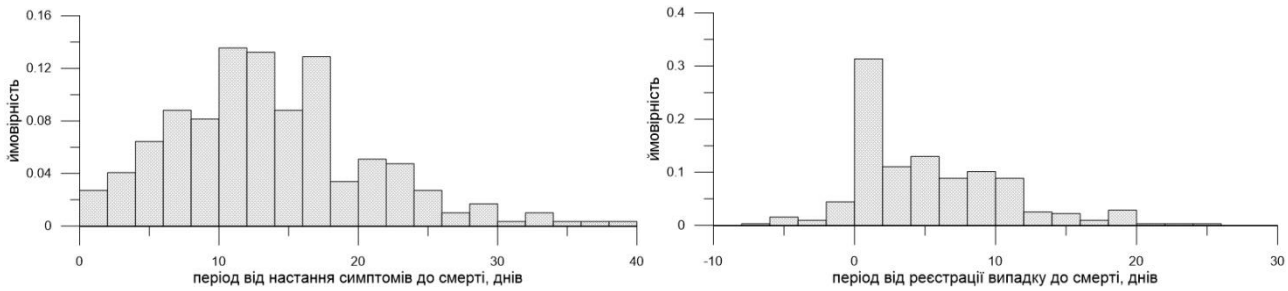


Рис.7. Розподіл часу від початку симптомів до смерті (ліворуч) і розподіл часу від реєстрації випадку до смерті (праворуч)

Оскільки математичну модель налаштовано саме на дати офіційної статистики, то при моделюванні було використано середній період часу між датою реєстрації та датою настання смерті. Було також впроваджено алгоритм визначення змінного в часі коефіцієнту летальності CFR (case fatality ratio). На рис.8 показано графік зміни в часі CFR, що відповідає статистичним даним та періоду настання смерті.

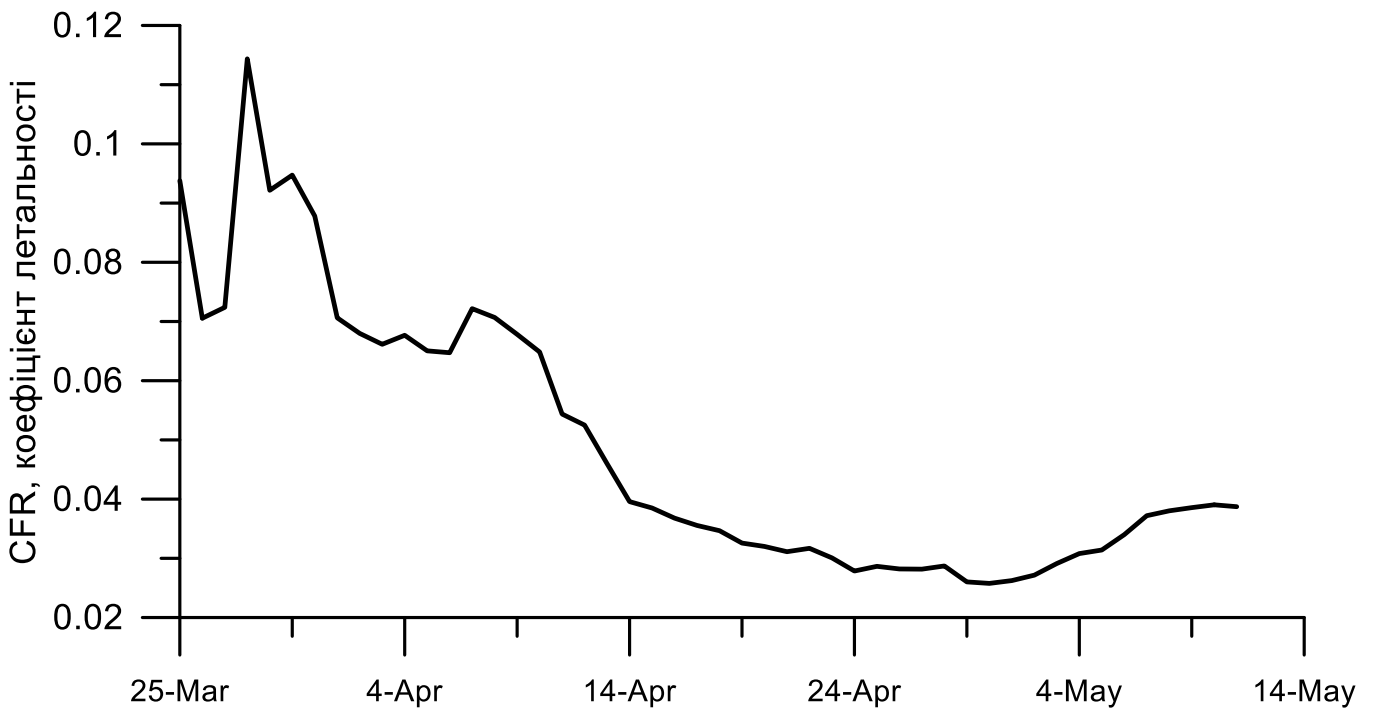


Рис.8. Зміна в часі коефіцієнту летальності (CFR)

З рис.8 видно, що коефіцієнт летальності постійно знижувався з часом, що стало причиною того, що прогнози РГ-1 – РГ-3 давали завищену смертність. А в останній тиждень коефіцієнт летальності збільшився, що призвело до заниження обчисленої смертності. При обчисленні наступного прогнозу вважалося, що коефіцієнт летальності залишається постійним, рівним 0.036, що більше середнього значення за весь період спостережень 0.027.

Розрахований у цих припущеннях прогноз на наступний період представлено на рис.9.

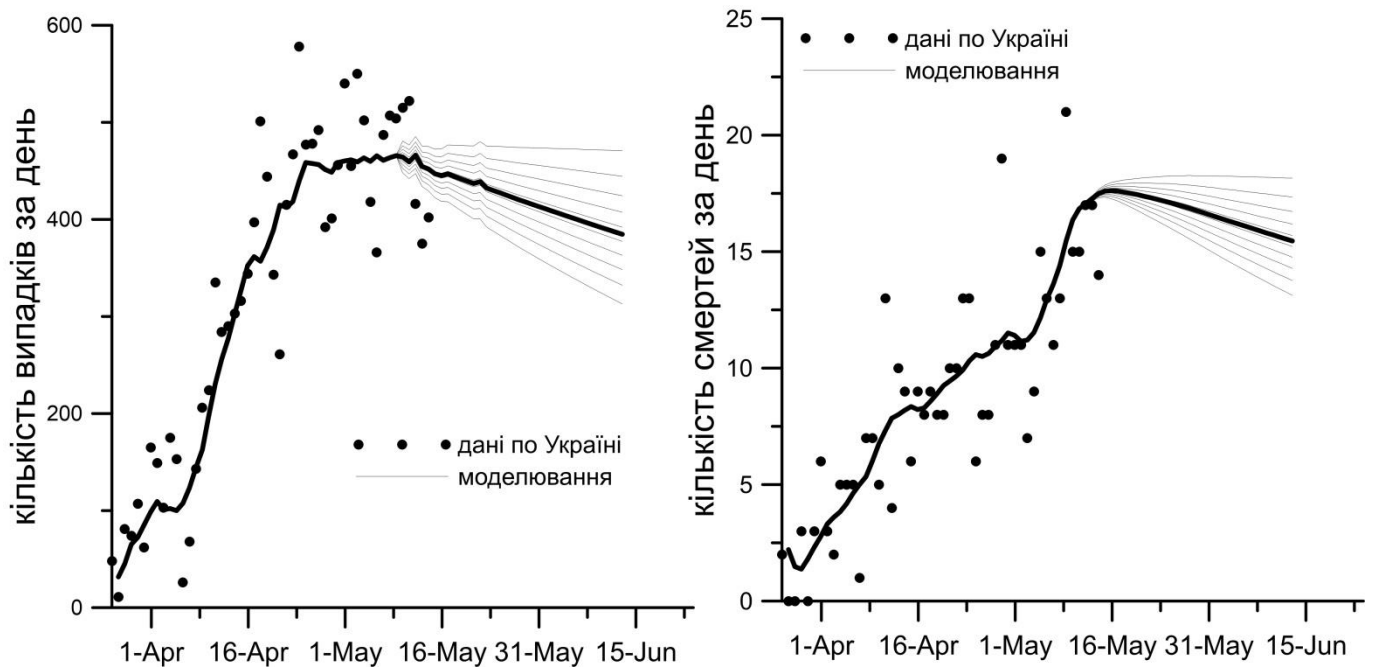


Рис.9. Прогнозні криві РГ-5, розраховані на період 13.05-13.06.2020 р., у порівнянні з загальною кількістю виявлених інфікованих (ліворуч) і щоденних нових виявлених летальних випадків (праворуч) за даними МОЗ України 26.03-12.05.2020 р. за передпрогностичний період

Цей проноз підтверджує результати попередніх прогнозів, що на поточний момент ми перебуваємо в зоні пологого максимуму, наступного тижня можна очікувати початку незначного зниження.

Головними факторами невизначеності прогнозування на наступний період є:

А) Зростання інтенсивності переміщень і контактності населення. Як демонструють графіки мобільності населення України (рис.3а), вже з кінця квітня спостерігається зростання мобільності, а отже, і контактності населення, навіть в умовах наявного карантину. Важко оцінити ступінь зростання контактності в умовах офіційного послаблення карантину з 12 травня.

Б) Непевним моментом при прогнозуванні залишається кількість смертей. Аналіз даних ЦГЗ МОЗ, з одного боку, свідчить про те, що збільшується відсоток тих, хто не має симптомів хвороби на момент звернення (кількість таких інфікованих становить близько 40%); з іншого боку, за останній тиждень зріс коефіцієнт летальності (рис.8). Прогноз було обчислено за припущення, що коефіцієнт летальності збереже поточне значення. Це припущення є досить непевним, оскільки не відомі причини його зміни. В Україні коефіцієнт летальності нижчий, ніж у наших західних сусідів. Такі дані нижчих коефіцієнтів летальності, ніж у західних країнах, надаються і в статистиці Російської Федерації та Республіки Білорусь. Фактори, які призводять до меншої, ніж у більшості інших країн, летальності захворювань на COVID-19 за даними країн колишнього СРСР, іще потребують вивчення.

**На поточний момент триває вихід із фази плато, який сповільнюється через поступове збільшення соціальної активності населення.**

Очікується, що кількість нових випадків після досягнення пікових медіанних значень близько 460 на добу буде поступово зменшуватися до медіанного значення 380 випадків на початок червня – за умови, що не буде різких спалахів, пов’язаних із виявленням нових осередків інфекції або збільшенням соціальної активності населення.

#### 4. Прогностична оцінка розвитку епідеміологічної ситуації у випадку суттєвого посилення соціальної активності населення з 20 травня 2020 р.

Кабінет Міністрів України розробив поетапний план виходу з карантину в Україні, перша фаза якого розпочалася 12 травня. Представлений вище прогноз розроблявся за припущення, що на цьому етапі буде спостерігатися лише незначне зростання соціальних контактів населення. Додатково розглядався сценарій з більш значним зростанням контактності (на 10%) з 22 травня (рис.10).

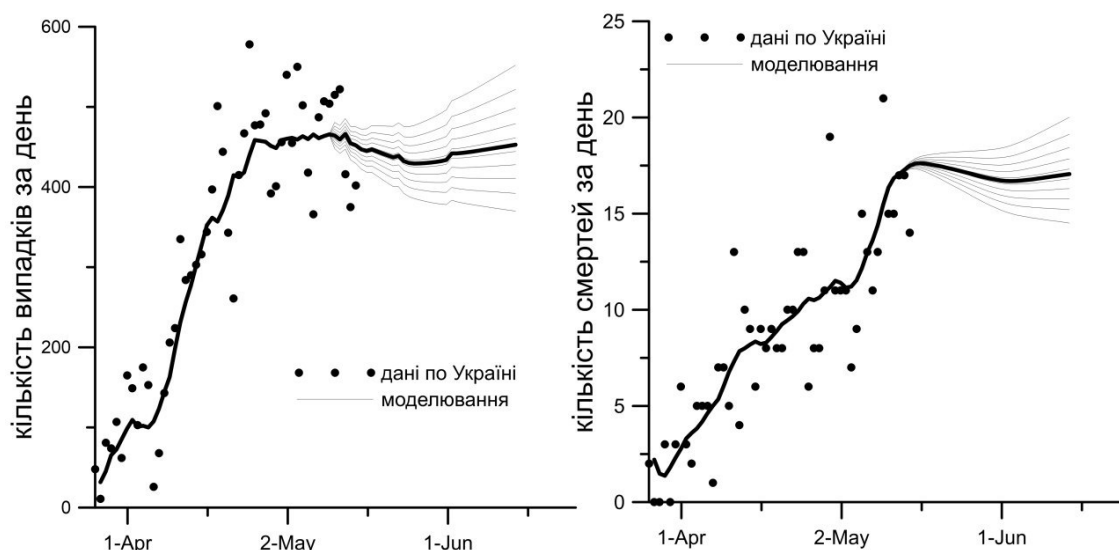


Рис.10. Прогнозні криві РГ-5, розраховані на період 13.05-20.05.2020р. за припущення підвищення контактності населення з 20 травня на 10% порівняно з сучасним рівнем

Ці розрахунки демонструють ризики утворення нової хвилі підвищення інфікованих в Україні при форсованому виході з карантину. Слід також відзначити, що збільшення контактів серед населення не обов’язково призводить до пропорційного збільшення коефіцієнту репродукції через те, що при дотриманні належних заходів безпеки додаткові соціальні контакти можуть не призводити до передачі інфекції.

#### ВИСНОВКИ

1. Порівняння попередніх прогнозів «Прогноз РГ-1», «Прогноз РГ-2», «Прогноз РГ-3», «Прогноз РГ-4» з даними продемонстрували, що прогнози й оцінки періоду настання пікових значень і амплітуд у цілому виправдалися.

2. Динаміка поширення епідемії в Україні зараз розвивається за сценарієм із невиразним піком і повільним згасанням за рахунок вчасного впровадження карантину, що підтверджує статистичне порівняння з даними сусідніх країн.
3. Прогноз на наступні тижні передбачає повільне згасання епідемії, але існують ризики другої хвилі епідемії при форсованому збільшенні соціальної активності населення.
4. Аналіз даних ЦГЗ МОЗ станом на 04.05.2020 р. виявив стабільне збільшення відсотка безсимптомних інфікованих в офіційній статистиці. Це вказує на зменшення кількості захворілих, які потребують госпіталізації чи домашнього лікування. Для уточнення прогнозів необхідне регулярне оновлення даних.
5. Оскільки статистичні дані не можна розглядати як абсолютно достовірні, то і результати моделювання можуть бути лише наближеними до реальної картини, і це за умов постійності дії визначених параметрів при прогнозуванні. Прогноз повинен періодично переглядатись у часі з урахуванням нових факторів впливу. Доцільним є посилення виявлення безсимптомних форм і з легким перебігом COVID-19 шляхом розширення тестування ПЛР, ІФА.