

ПРОГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ ЕПІДЕМІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОРОНАВІРУСНОЇ ІНФЕКЦІЇ COVID-19 В УКРАЇНІ

С. О. Соловійов^{1,2}, І. В. Дзюблик¹, О. П. Мінцер¹

¹Національна медична академія післядипломної освіти імені П. Л. Шупика

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Представлено визначення особливостей і розроблення моделі прогнозування епідемічного процесу COVID-19 в Україні на основі наявних епідеміологічних даних та існуючих тенденцій. Моделювання епідемічного процесу COVID-19 базувалося на класичній епідеміологічній моделі. Основний параметр моделі — параметр передавання SARS-CoV2 був визначений чисельно з використанням наявних епідеміологічних даних: щоденних звітів Міністерства охорони здоров'я України про абсолютну кількість хворих на COVID-19. Число визначення параметра передавання SARS-CoV2 за абсолютною кількістю хворих на COVID-19 у кожному регіоні та в Україні показало тенденцію до зменшення з часом. Апроксимація отриманих числових значень параметру передавання SARS-CoV2 здійснювалась між 07 квітня та 02 травня 2020 року за допомогою експоненціальної функції. Результати прогностичного моделювання показали, що до кінця літа 2020 року очікується близько 25 тис. випадків COVID-19, а пік захворюваності припадає на час дослідження (28 квітня — 05 травня 2020 року). Крім того, дослідження дозволили проаналізувати інтенсивність епідемічного процесу в різних регіонах України на підставі обчислених середніх значень передавання SARS-CoV2 у період з 07 квітня по 02 травня 2020 року. Було визначено, що найбільш інтенсивний епідемічний процес у Харківській, Луганській і Миколаївській областях, який може бути корисною інформацією для прийняття відповідних управлінських рішень щодо поглиблення заходів карантину в цих регіонах. Прогнозування можливих наслідків впровадження різних програм контролю COVID-19 передбачає комплексне вивчення епідемічного процесу захворювання в цілому та протягом певних періодів часу з подальшою побудовою адекватної моделі прогнозування. Нами запропоновано просту прогностичну модель, але ефективний інструмент для прогнозування епідемічного процесу COVID-19, що може бути корисним у практичній роботі медичних працівників.

Ключові слова: коронавірусна інфекція, COVID-19, епідеміологія, математичне моделювання, прогнозування.

PREDICTION MODEL OF CORONAVIRUS INFECTION COVID-19 EPIDEMIC PROCESS IN UKRAINE

S. O. Soloviov^{1,2}, I. V. Dziublyk¹, O. P. Mintser¹

¹Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Background. Identification of features and development of prediction model of COVID-19 epidemic process in Ukraine on the basis of available epidemiological data and existing trends. Modeling of COVID-19 epidemic process was based on classic epidemiological model.

Materials and methods. Key parameter of the model — transmission parameter of SARS-CoV2 was determined numerically with the use of available epidemiological data: daily reports of the Ministry of Health of Ukraine of the absolute number of patients with COVID-19. Numerical determination of transmission parameter of SARS-CoV2 according to the absolute number of patients with COVID-19 in each region and in Ukraine showed its tendency to decrease over time. Approximation of the obtained numerical values of the transmission parameter of SARS-CoV2 was carried out between April 7 and May 2, 2020 using the exponential function.

Results. The results of prognostic modeling showed that by the end of summer 2020 about 25 thousand people with COVID-19 are expected, and the peak incidence occurs at the time of the study (April 28 — May 5, 2020). In addition, research allowed us to analyze the intensity of the epidemic process in different regions of Ukraine on the basis of the calculated average values of SARS-CoV2 transmission in the period from April 7 to May 2, 2020. It was determined that the most intensive epidemic process is in Kharkiv, Luhansk and Mykolayiv regions, which can be useful information for making appropriate management decisions to deepen quarantine measures in these regions.

Conclusions. Predicting the possible consequences of the implementation of various health care control programs COVID-19 involves a comprehensive study of the epidemic process of the disease as a whole and for certain periods of time with the subsequent construction of an adequate prediction model. We proposed a simple prediction model, but effective tool for predicting the epidemic process COVID-19 that can be useful in the practical work of health professionals.

Key words: coronavirus infection, COVID-19, epidemiology, mathematical modeling, prediction.

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ COVID-19 В УКРАИНЕ

С. А. Соловьёв^{1,2}, И. В. Дзюблик¹, О. П. Минцер¹

¹Национальная медицинская академия последипломного образования имени П. Л. Шупика

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Представлено определение особенностей и разработка модели прогнозирования эпидемического процесса COVID-19 в Украине на основе имеющихся эпидемиологических данных и существующих тенденций. Моделирование эпидемического процесса COVID-19 базировалось на классической эпидемиологической модели. Основной параметр модели — параметр передачи SARS-CoV2 был определен численно с использованием имеющихся эпидемиологических данных: ежедневных отчетов Министерства здравоохранения Украины об абсолютном количестве больных COVID-19 в каждом регионе и в Украине показало тенденцию к уменьшению со временем. Аппроксимация полученных числовых значений параметра передачи SARS-CoV2 осуществлялась между 07 апреля и 02 мая 2020 года с помощью экспоненциальной функции. Результаты прогностического моделирования показали, что к концу лета 2020 года ожидается около 25 тысяч случаев COVID-19, а пик заболеваемости приходится на время исследования (28 апреля — 05 мая 2020 года). Кроме того, исследования позволили проанализировать интенсивность эпидемического процесса в различных регионах Украины на основании вычисленных средних значений передачи SARS-CoV2 в период с 07 апреля по 02 мая 2020 года. Было определено, что наиболее интенсивный эпидемический процесс в Харьковской, Луганской и Николаевской областях, что может быть полезной информацией для принятия соответствующих управленческих решений по углублению карантинных мер в этих регионах. Прогнозирование возможных последствий внедрения различных программ контроля COVID-19 предусматривает комплексное изучение эпидемического процесса заболевания в целом и в течение определенных периодов времени с последующим построением адекватной модели прогнозирования. Нами предложена простая прогностическая модель, но эффективный инструмент для прогнозирования эпидемического процесса COVID-19, который может быть полезным в практической работе медицинских работников.

Ключевые слова: коронавирусная инфекция, COVID-19, эпидемиология, математическое моделирование, прогнозирование.

Вступ. Роль вірусів у виникненні та розвитку інфекційних захворювань органів дихання людини невідомо зростає. Тільки на початку 21 століття з'явилося 11 нових респіраторних вірусів, більшість з яких здатні викликати тяжкі захворювання органів дихання, що нерідко завершуються летально. Серед них велике занепокоєння викликають нові коронавіруси людини, що отримали назву SARS-CoV (від англ. Severe acute respiratory syndrome Coronavirus) і MERS-CoV (від англ. Middle East respiratory syndrome Coronavirus). Обидва віруси спричиняють захворювання органів дихання з високими показниками летальності. Вірус SARS-CoV зумовлює розвиток тяжкого гострого респіраторного синдрому (ТГРС), а коронавірус MERS-CoV — близькохідний респіраторний синдром (БСРС). Від початку появи ТГРС у 2002 році, а потім БСРС у 2012 році, спеціалісти ВООЗ суттєво підвищили рівень епідемічної безпеки по відношенню до збудників цих тяжких захворювань людини, а інтенсивне вивчення нових представників родини Coronaviridae призвело до стрімкого накопичення наукових даних щодо їх молекулярної біології, особливостей епідеміології, клініки, етіологічної діагностики та лікування [1, 2].

На початку 2020 року однією із найбільш актуальних проблем для людства стала нова коронавірусна інфекція (COVID-19 або Coronavirus infection disease), з якою людство раніше не зустрічалося. Так, ще у грудні 2019 року в китайському місті Ухань було зафіксовано спалах атипової пневмонії, викликаній невідомим типом коронавірусу, що отримав назву Coronavirus 2019-nCoV [3]. Пізніше, генетичний аналіз показав, що новий коронавірус відноситься до роду Betacoronavirus і був переіменований на SARS-CoV-2. Дуже швидко SARS-CoV-2 розповсюдився за межі Китаю та поширився на всі континенти світу (крім Антарктиди) та вразив населення розвинених країн світу, таких як: США, Південна Корея, Італія, Іспанія, Німеччина, Велика Британія, Іран, Японія, а також Росія та Україна. 11 березня 2020 року ВООЗ оголосила про пандемію COVID-19 і оцінила цю подію «надзвичайною ситуацією в області суспільної охорони здоров'я, що має міжнародне значення» [4]. За неповних 5 місяців від перших повідомлень про випадки нового респіраторного захворювання, станом на 06 травня 2020 року захворюваність на COVID-19 у світі наближається до 4 млн випадків і становить 3 778 016 з летальністю близько 7 %,

що знаходиться в межах від 4,17 % у Німеччині до 13,8 % в Італії [5]. За даними Центру громадського здоров'я (ЦГЗ) в Україні на цю ж дату зареєстровано 13184 випадки COVID-19, померли 327 осіб, переважно поважного віку із хронічними супутніми захворюваннями (летальність 2,48 %) [6].

Важливо підкреслити, що в провідних лабораторіях Китаю, США та деяких інших високо розвинутих країнах світу встановлено та охарактеризовано новий коронавірус людини SARS-CoV-2, який генетично тісно пов'язаний із оригінальним SARS-CoV, проте досі не завершена розробка засобів специфічної профілактики COVID-19, не винайдено ефективних етіотропних противірусних препаратів для лікування тяжко хворих. З огляду на таку критичну ситуацію, практично єдиною можливістю запобігти розповсюдженню COVID-19 є введення жорстких карантинних заходів, спрямованих на ізоляцію хворих, контактних осіб і вірусоносіїв, соціальне дистанціювання, застосування антисептиків і дезінфектантів. Від так, пік захворюваності в світі ще не пройдено, і достеменно не відомо, скільки часу ще триватиме пандемія COVID-19. Відомими експертами ВООЗ прогнозується нова хвиля поширення SARS-CoV-2 у другому півріччі 2020 року. Ця ситуація в повній мірі стосується й України. Надзвичайно важливим та актуальним завданням для охорони здоров'я країни стало прогнозування можливого подальшого розвитку та особливостей епідемічного процесу на основі доступних (офіційних) епідеміологічних даних і побудова прогностичної моделі епідемічного процесу COVID-19 в Україні.

Мета роботи: виявлення особливостей і побудова прогностичної моделі епідемічного процесу COVID-19 в Україні на основі доступних епідеміологічних даних та існуючих тенденцій.

Матеріал і методи дослідження. Особливості та обґрунтування прогностичної моделі епідемічного процесу COVID-19. Сценарій епідемічного процесу COVID-19 як гострої респіраторної вірусної інфекції з математичної точки зору ґрунтується на базовій епідеміологічній моделі, запропонованій У. Кермаком і А. Маккендріком ще в 1927 році [7, 8]. Відповідно до цієї моделі осіб у популяції можна розділити на «сприйнятливих» (S — «susceptible»), які раніше не піддавалися впливу збудника SARS-CoV2), «інфікованих» (I — «infectious»), які мають COVID-19 із проявом клінічних симптомів), та тих, які одужали або померли після перенесеної COVID-19 (R — «recovered») (рис. 1).

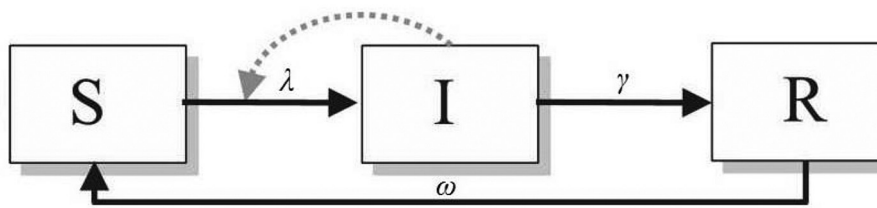


Рис. 1. Базова епідеміологічна модель COVID-19

Перехід від S до I представляє нові випадки COVID-19 та визначається силою інфекції λ (швидкістю інфікування SARS-CoV2). Для гострих інфекцій, як правило, спостерігається той факт, що період, протягом якого особа є інфікованою або хворою («інфекційний період») розподілений навколо деякого середнього значення, яке може бути точно оцінено за ретроспективними епідеміологічними даними. Математично це виражається в ймовірності переходу осіб зі стану I до стану R, що залежить від того, як довго вони були в стані I. Тим не менш, епідеміологи часто роблять

припущення, що швидкість одужання γ — величина, зворотня до середнього інфекційного періоду. Втрата набутого імунітету з часом відображена переходом зі стану R до стану S зі швидкістю ω .

На практиці неможливим є визначення таких параметрів епідеміологічної моделі як швидкість одужання, швидкість втрати набутого імунітету, а також кількість осіб, які одужали та набули імунітету. Оскільки на меті дослідження було тільки прогнозування кількості нових випадків (захворюваності) COVID-19 це дозволило виокремити підмодель, що описує тільки цей процес (рис. 2).

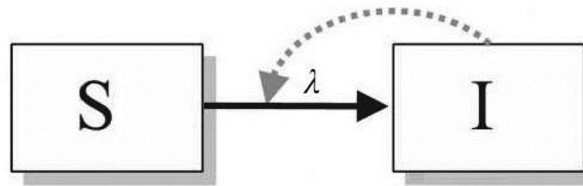


Рис. 2. Модель захворюваності COVID-19

Математично модель захворюваності COVID-19 може бути описана наступним рівнянням, за яким кількість хворих осіб на COVID-19 у кожен наступний момент часу залежить від кількості всіх осіб, які захворіли до цього часу.

$$I_{(t+1)} = I_t + \lambda_t \cdot S_t, \quad (1)$$

де I_t — загальна кількість хворих осіб на COVID-19 у певний момент часу; I_{t+1} — загальна кількість хворих осіб на COVID-19 у наступний момент часу; S_t — загальна кількість сприйнятливих осіб у популяції у певний момент часу.

Сила інфекції λ (швидкість інфікування SARS-CoV2) залежить від трьох різних факторів: поширеності інфікованих осіб, структури контактів населення та ймовірності інфікування при контакті з хворою особою:

$$\lambda_t = \beta_t \cdot I_t / N_t, \quad (2)$$

де I_t — загальна кількість хворих осіб на COVID-19 у певний момент часу; N_t — загальна

кількість осіб у популяції у певний момент часу; β_t — параметр передавання збудника SARS-CoV2 у певний момент часу.

Підстановка формули (2) у формулу (1) дозволяє визначити параметр передавання збудника SARS-CoV2 як основний параметр епідемічного процесу COVID-19 у кожний момент часу на основі доступних епідеміологічних даних спостережень:

$$\beta_t = (I_{(t+1)} - I_t) / (I_t / N_t \cdot S_t). \quad (3)$$

Ураховуючи той факт, що $I_t \ll N_t$, а $S_t \approx N_t$, формула (3) може бути спрощена без втрати точності:

$$\beta_t = (I_{(t+1)} - I_t) / I_t. \quad (4)$$

Для визначення чисельних значень параметр передавання збудника SARS-CoV2 були використані доступні на момент дослідження щоденні звіти МОЗ України про абсолютну кількість хворих на COVID-19 як за окремими регіонами, так і по Україні в цілому (рис. 3).

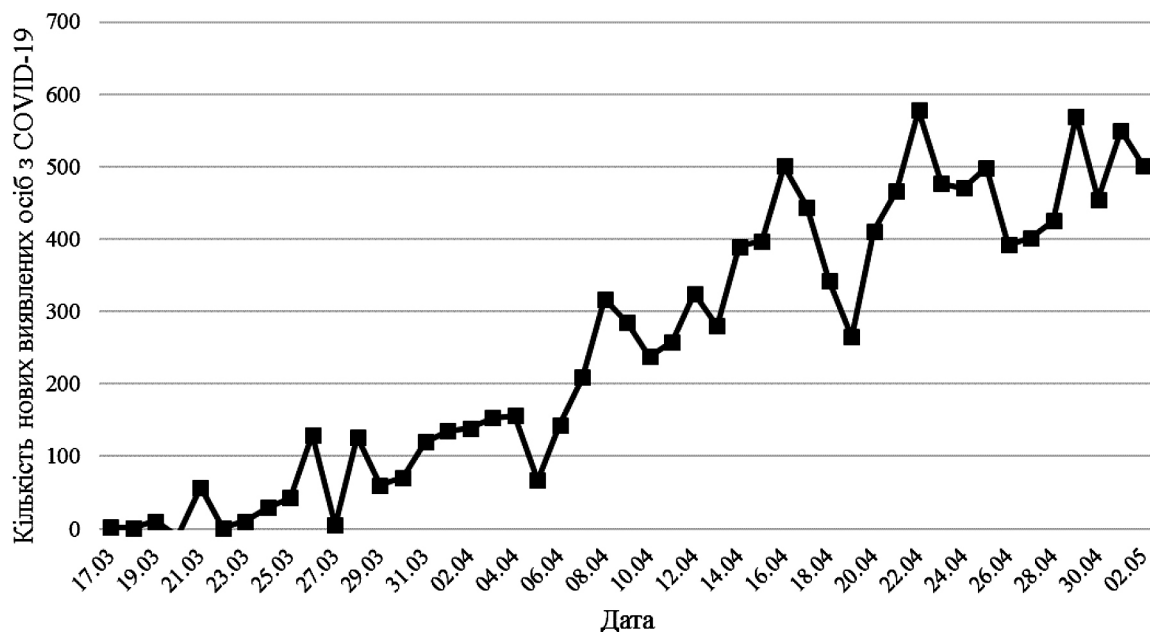


Рис. 3. Абсолютна кількість хворих на COVID-19 по Україні за даними МОЗ

Результати та їх обговорення. Першим кроком дослідження стало чисельне визначення параметру передавання збудника SARS-CoV2 за даними абсолютної кількості хворих на COVID-19 осіб як у кожному регіоні, так і в Україні в цілому. Наприклад, за сумарними даними по Україні чисельне визначення параметру передавання збудника SARS-CoV2 показало його тенденцію до згасання з часом (рис. 4). Попередній аналіз

показав неможливість використання результатів обчислень на проміжку часу від 17 березня до 06 квітня 2020 року з огляду на великий розкид отриманих значень. Апроксимація отриманих чисельних значень параметру передавання збудника SARS-CoV2 була проведена на проміжку від 07 квітня до 02 травня 2020 року з використанням експоненційної функції загального вигляду $\beta_t = \beta_0 \cdot e^{(-\beta_1 \cdot t)}$. (рис. 5).

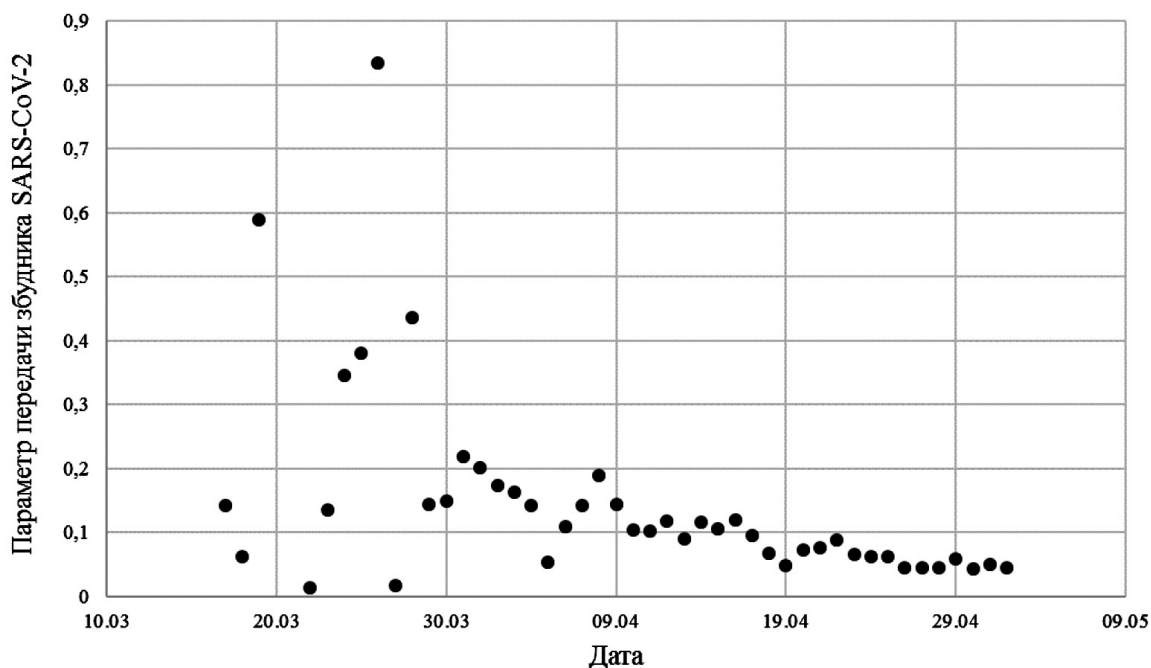


Рис. 4. Попереднє чисельне визначення параметру передавання збудника SARS-CoV2 (за сумарними даними по Україні)

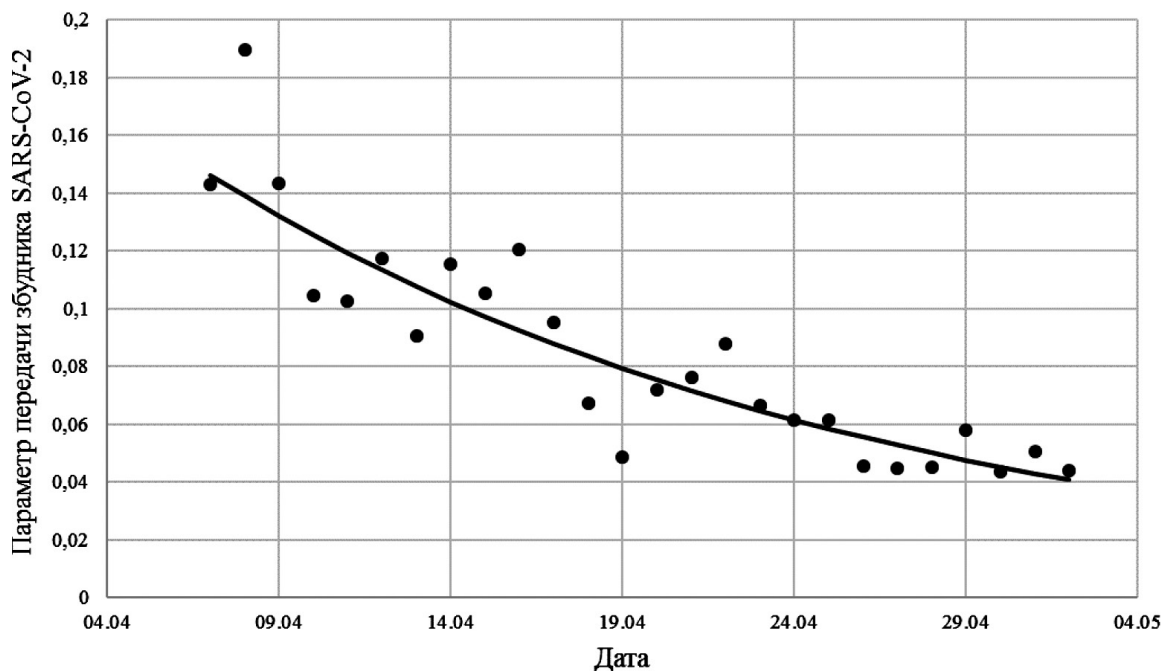


Рис. 5. Апроксимація чисельних значень параметру передавання збудника SARS-CoV2 (за сумарними даними по Україні; $\beta_0 = 0,154$, $\beta_1 = 0,051$, $R^2 = 0,83$)

Визначення аналітичного вигляду параметру передавання збудника SARS-CoV2 дозволив зробити адекватний прогноз захворюваності COVID-19 як у кожному регіоні, так і в Україні. Результати прогностичного моделювання

показали, що до кінця літа 2020 року очікується близько 25 тисяч осіб із COVID-19 (рис. 6), а пік захворюваності припадає на момент проведення дослідження (28 квітня — 05 травня 2020 року) (рис. 7).

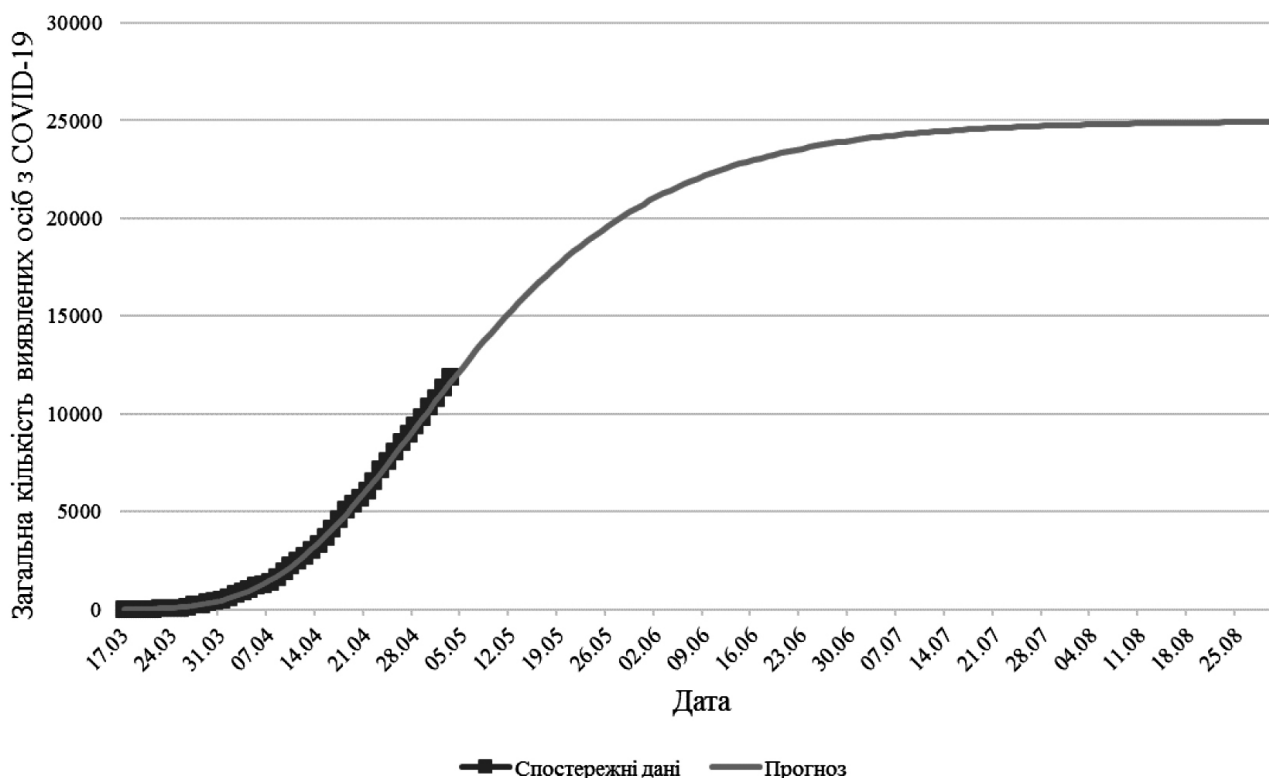


Рис. 6. Загальна кількість виявлених випадків COVID-19 в Україні (спостереження та прогноз)

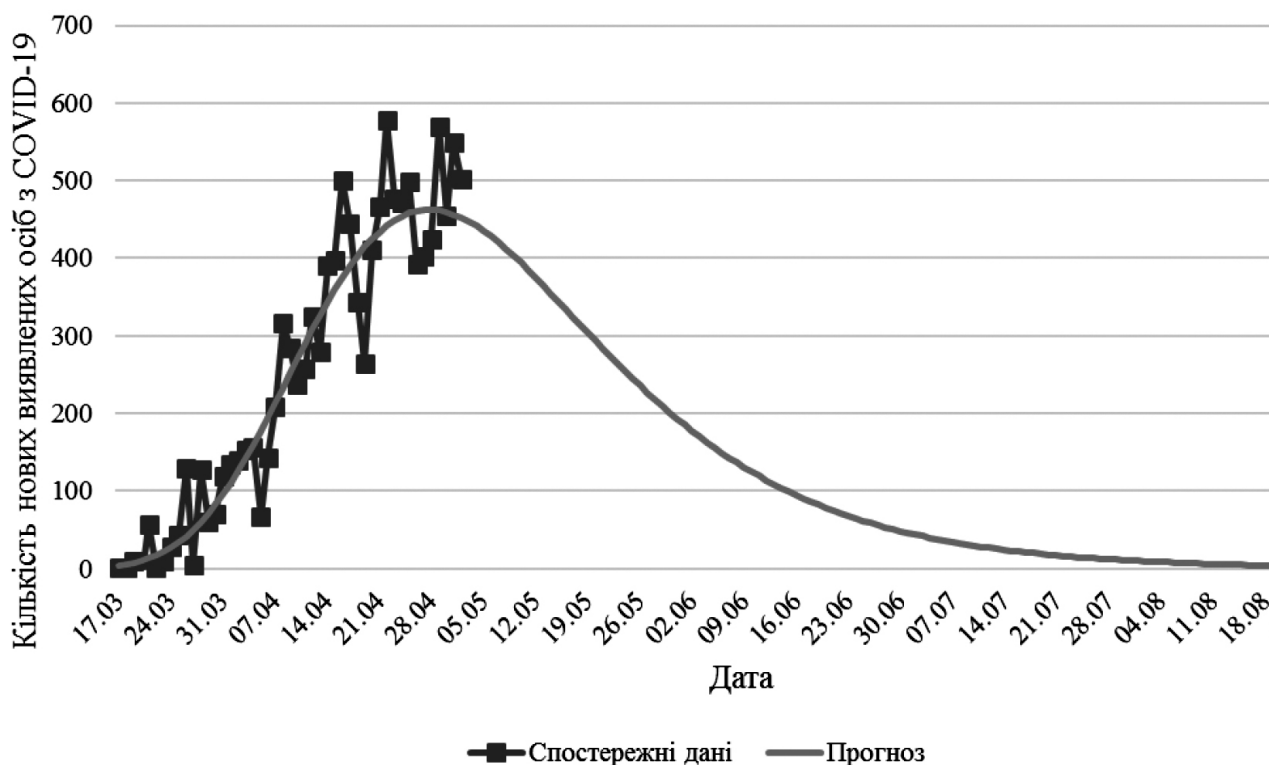


Рис. 7. Кількість нових випадків COVID-19 в Україні (спостереження та прогноз)

Нами було проведено порівняльний аналіз визначення параметру передавання збудника SARS-CoV2 за сумарними даними по Україні та за усередненням після розрахунку для окремих

регіонів. Аналіз показав тотожність результатів розрахунків, що додатково засвідчило валідність запропонованої прогностичної моделі (рис. 8).

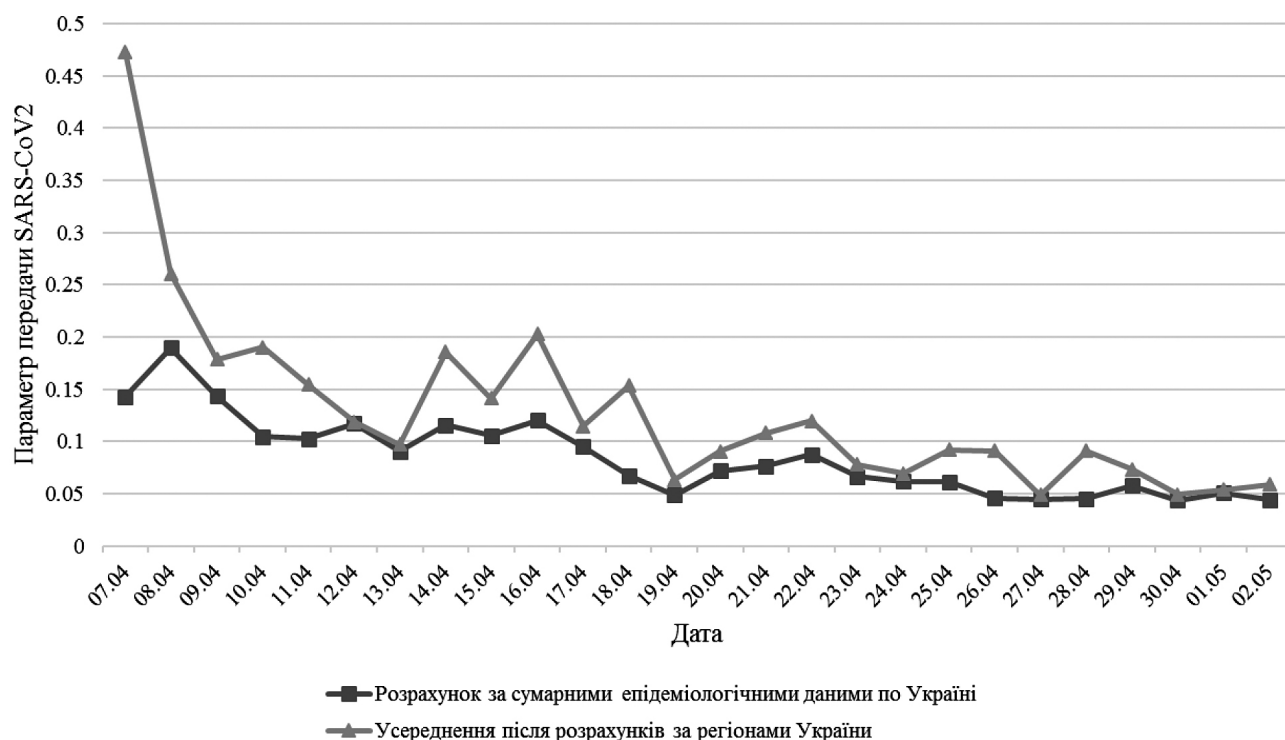


Рис. 8. Порівняння розрахованих параметрів передавання збудника SARS-CoV2 за даними по Україні та за окремими регіонами з подальшим усередненням

Крім того, наші дослідження дозволили проаналізувати інтенсивність епідемічного процесу в різних регіонах України на основі розрахованих середніх значень передачі збудника SARS-CoV2 у період з 07 квітня по 02 травня 2020 року. Було визначено,

що найбільш інтенсивним епідемічний процес є у Харківській, Луганській та Миколаївській областях, що може бути корисною інформацією для прийняття відповідних управлінських рішень щодо поглиблення карантинних заходів у цих регіонах (рис. 9).

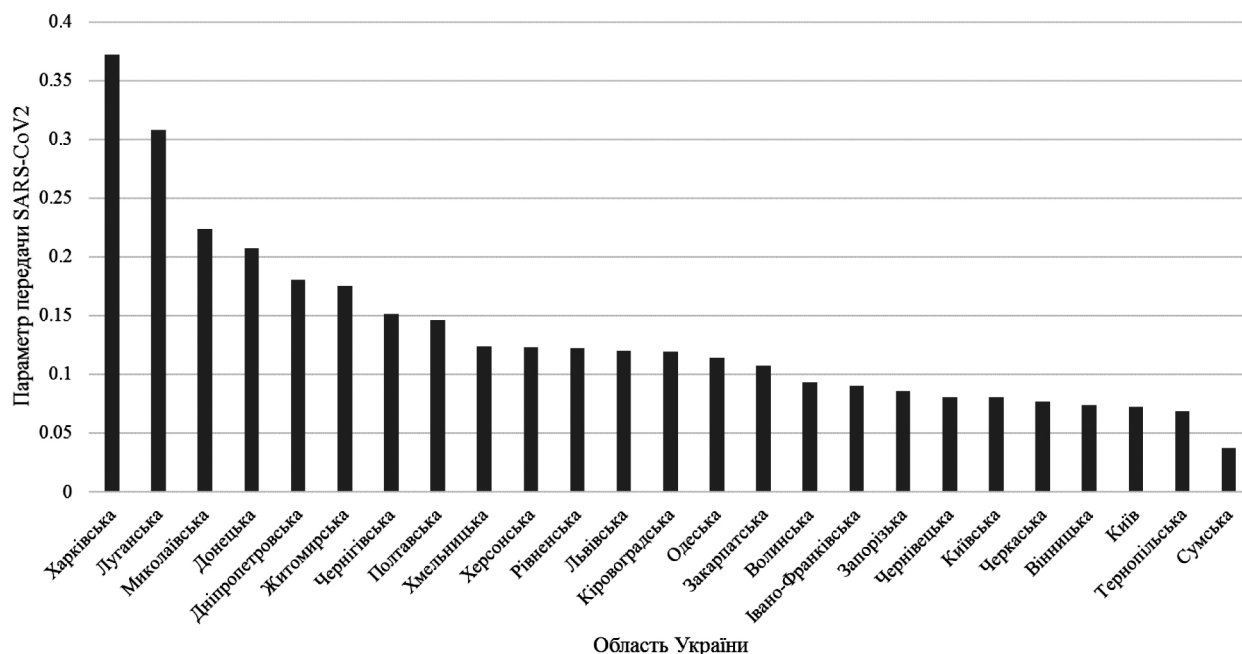


Рис. 9. Дослідження інтенсивності епідемічного процесу COVID-19 за середніми значеннями параметра передавання збудника SARS-CoV2 по регіонах

Методологія проведених досліджень повністю узгоджується з принципами математичної епідеміології та проведеними дослідженнями інших науковців щодо моделювання епідемічного процесу COVID-19 в інших регіонах. Так, запропоновано стохастичну модель поширення захворювання на основі ретроспективних даних захворюваності в Ухані. Розроблено та параметризовано індивідуально-орієнтовану модель поширеності SARS-CoV2 для виявлення потенційних джерел інфекції. Проаналізовано різні розрахунки основного числа відтворення — середньої кількості вторинних випадків захворювання [9-11].

Подібні роботи є цікавими аналітичними дослідженнями, але зазвичай мають надмірну математичну складову, важкі чисельні розрахунки, а в деяких із них введено певні стани, наприклад, кількість осіб в інкубаційному періоді, що важко оцінити на практиці. Хоча наша робота й ґрунтується на схожих принципах у ній було використано просту математичну модель, що дозволяє робити розрахунки в доступних інформаційних пакетах програм без втрати якості.

Висновки. Прогнозування можливих наслідків впровадження різних програм охорони здоров'я з контролю COVID-19 передбачає всебічне вивчення особливостей епідемічного процесу цього захворювання як у цілому, так і за певні проміжки часу з подальшою побудовою адекватної прогностичної моделі. Нами було запропоновано математичну модель епідемічного процесу COVID-19 та визначено її основний параметр передавання збудника SARS-CoV2, що є комплексною характеристикою структури контактів населення та ймовірності інфікування при контакті з хворою особою. Наші розрахунки та аналіз їх результатів показав, що динаміка параметру передавання збудника SARS-CoV2 має експоненційно затухаючий характер, що вказує на поступове встановлення ендемічної рівноваги поширеності COVID-19 серед населення України та очікувану кількість випадків COVID-19 на рівні близько 25 тисяч осіб до кінця літа 2020 року за умови збереження існуючих тенденцій епідемічного процесу коронавірусної інфекції. Дослідження також дозволили оцінити інтенсивність епідемічного процесу COVID-19 у різних регіонах України,

та визначити потенційно найбільш проблемні з них. Розроблена модель є простим, але в той же час ефективним інструментом прогнозування

епідемічного процесу COVID-19 та може стати у нагоді в практичній роботі спеціалістів охорони здоров'я.

Література.

1. Peiris J. S. M. Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome [Text] / J. S. M. Peiris, S. T. Lai, L. L. M. Poon et al. // *Lancet*. — 2003. — Vol. 361. — P. 1319-1325.
2. Drosten C. Identification of a novel coronavirus in patients with severe acute respiratory syndrome [Text] / C. Drosten, S. Ginther, W. Preiser et al. / *N. Engl. J. Med.* — 2003. — Vol. 348. — P. 967-976.
3. Дзюблик І. В. Нові коронавіруси людини та захворювання органів дихання / І. В. Дзюблик, О. В. Кукало // *Український пульмонологічний журнал*. — 2015. — № 4. — С. 53-59.
4. Novel Coronavirus 2019-nCoV. — Режим доступу: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (last accessed 29.01.2020).
5. Coronavirus disease (COVID-19) Pandemic. — Режим доступу: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (дата звернення: 20.03.2020).
6. Coronavirus Update (Live). — Режим доступу: https://www.worldometers.info/coronavirus/?utm_campaign=homeAdvegas1? (дата звернення: 05.05.2020).
7. Коронавірусна інфекція COVID-19. Центр громадського здоров'я. — Режим доступу: <https://www.phc.org.ua/kontrol-zakhvoryuvan/inshi-infekciyni-zakhvoryuvannya/koronavirusna-infekciya-covid-19> (дата звернення: 05.05.2020).
8. Dietz K. Epidemics and Rumours: A Survey / K. Dietz // *Journal of the Royal Statistical Society*. — 1967. — V. 130. — P. 505-528.
9. Kermack W. O. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // *Proceedings of the Royal Society of London*. — 1927. — V. 115. — P. 700-721.
10. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study / A. J. Kucharski, T. W. Russell, C. Diamond, Y. Liu et al. // *Lancet Infect Dis*. — 2020. — 20. — P. 553-558.
11. Estimating the overdispersion in COVID-19 transmission using outbreak sizes outside China [version 1; peer review: 1 approved] / A. Endo, S. Abbott et al. // *Wellcome Open Res*. — 2020. — № 5. — P. 67.
12. Liu Y. The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus / Y. Liu, A. A. Gayle, A. Wilder-Smith, J. Rocklöv // *J. Travel Med.* — 2020. — № 27 (2). — taaa021.

References.

1. Peiris, J. S. M, Lai, S. T., Poon, L. L. M. et al. (2003). Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome. *Lancet*, 361, 1319-25.
2. Drosten, C., Ginther, S., Preiser, W. et al. (2003). Identification of a novel coronavirus in patients with severe acute respiratory syndrome. *N. Engl. J. Med.*, 348, 967-76.
3. Dzyublyk, I. V., Kukalo, O. V. (2015). New human coronaviruses and respiratory diseases. *Ukr. J. Pulmon.*, 4, 53-9.
4. Novel Coronavirus 2019-nCoV. URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (last accessed 29.01.2020).
5. Coronavirus disease (COVID-19) Pandemic. URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (date of appeal: 20.03.2020).
6. Coronavirus Update (Live) URL: https://www.worldometers.info/coronavirus/?utm_campaign=homeAdvegas1? (date of appeal: 05.05.2020).
7. Coronavirus infection COVID-19. *Public Health Center* URL: <https://www.phc.org.ua/kontrol-zakhvoryuvan/inshi-infekciyni-zakhvoryuvannya/koronavirusna-infekciya-covid-19> (date of appeal: 05.05.2020).
8. Dietz, K. (1967). Epidemics and Rumours: A Survey. *J. Royal Stat. Soc.*, 130, 505-28.
9. Kermack, W. O., McKendrick, A. G. (1927). A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proc. Royal Soc. London*, 115, 700-21.
10. Kucharski, A. J., Russell, T. W., Diamond, C., Liu, Y. et al. (2020). Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *Lancet Infect Dis*. 20, 553-8. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30144-4.
11. Endo, A., Abbott, S. et al. (2020). Estimating the overdispersion in COVID-19 transmission using outbreak sizes outside China [version 1; peer review: 1 approved]. *Wellcome Open Res.*, 5, 67.
12. Liu, Y., Gayle, A. A., Wilder-Smith, A., Rocklöv, J. (2020). The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. *J. Travel Med.*, 27 (2), taaa021. doi: 10.1093/jtm/taaa021.