

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 519.816+578.834.1

В. Б. Мокін, М. В. Дратований, А. В. Лосенко, С. О. Жуков

ПРОГНОЗУВАННЯ ХВИЛЬ КОРОНАВІРУСУ НА ОСНОВІ
ВІДНОВЛЕНОЇ КОГНІТИВНОЇ КАРТИ
МІЖРЕГІОНАЛЬНОГО ВПЛИВУ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У даній статті розглянуто актуальне завдання прогнозування дат старту, піку та завершення хвиль щодобових приростів кількості підтверджених хворих на коронавірус у заданому регіоні на основі когнітивної карти, яка враховує міжрегіональний вплив, тобто інших регіонів на заданий, і – навпаки. Запропоновано метод ідентифікації ваг такої когнітивної карти для регіонів- сусідів. Розроблено поетапний алгоритм застосування цього методу на практиці за реальними даними по хворих на коронавірус у цих регіонах, наведено ряд прийомів щодо його реалізації та здійснено його автоматизацію на Python. Наведено приклад для перевірки працездатності запропонованих методу та алгоритму на прикладі аналізу взаємовпливу та прогнозування дати завершення хвилі коронавірусу в Україні за даними по Румунії на основі відновлених ваг когнітивної карти 2-го порядку.

Ключові слова: когнітивне моделювання, когнітивна карта, коронавірус, хвиля кількості нових підтверджених хворих, теорія графів.

Аннотация. В данной статье рассмотрена актуальная задача прогнозирования дат старта, пика и завершения волн ежесуточных приростов количества подтвержденных больных коронавирусом в заданном регионе на основе когнитивной карты, учитывающей межрегиональное влияние, то есть других регионов на заданное, и – наоборот. Предложен метод идентификации весов такой когнитивной карты для регионов-соседей. Разработан поэтапный алгоритм применения этого метода на практике по реальным данным по больным коронавирусом в этих регионах, приведен ряд приемов по его реализации и осуществлена его автоматизация на Python. Представлен пример для проверки работоспособности предложенных метода и алгоритма на примере анализа взаимодействия и прогнозирования даты завершения волны коронавируса в Украине по данным по Румынии на основе восстановленных весов когнитивной карты 2-го порядка.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, когнитивная карта, коронавирус, волна количества новых подтвержденных больных, теория графов.

Abstract. This article considers the urgent task of predicting the start, peak and end waves of daily increases in the number of confirmed coronavirus patients in a given region based on a cognitive map that takes into account interregional influence, ie other regions on a given, and vice versa. A method for identifying the weights of such a cognitive map for neighboring regions is proposed. A step-by-step algorithm for applying this method in practice based on real data on coronavirus patients in these regions has been developed, a number of techniques for its implementation have been presented, and its automation in Python has been carried out. An example is given to test the efficiency of the proposed method and algorithm on the example of interaction analysis and prediction of the end date of the coronavirus wave in Ukraine according to Romania based on the restored weights of the second order cognitive map.

Key words: cognitive modeling, cognitive map, coronavirus, wave of new confirmed patients, graph theory. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-52-3-86-94>.

Вступ

Пандемія коронавірусу досі лишається однією з найбільших проблем людства. Усі країни світу пережили вже не одну хвилю, які рахують по кількості щоденних підтверджених нових хворих. Поки вчені усієї планети шукають способи побороти проблему, інші намагаються хоч якось адаптуватись до неї. А для цього важливо навчитись якомога раніше прогнозувати появу нових хвиль, в ідеалі – 3 її основні часові параметри: дата старту, дата піку, дата завершення. Без такої мінімальної інформації країнам та їх регіонам вкрай важко здійснювати будь-яке планування в усіх сферах життя.

Актуальність

Проблемою прогнозування часових параметрів хвиль коронавірусу у заданому регіоні займається велика кількість вчених. В Україні цим займається міжвідомча Робоча група при Національній академії наук України з математичного моделювання проблем, пов'язаних з епідемією коронавірусу SARS-CoV-2 в Україні, яка регулярно готує аналітику для РНБО України та інших установ та інституцій. Членом цієї робочої групи є один зі співавторів даної статті. Вчені використовують різні підходи: методи математичного моделювання з використанням SIR-моделей та їх модифікацій, використання методів машинного навчання за багатьма різними ознаками, методів статистичного і регресійного аналізу, методів теорії часових рядів (ARIMA, Prophet) та ін. [1-5]. Але усі вони мають ряд недоліків: по-перше, велика невизначеність та чималі проблеми з якістю вхідних даних (у т.ч. затримки з оприлюдненням інформації на 3-30 днів; затримки, через свята; затримки на рівні країн, через різні часові пояси, тощо), а по-друге, у більшості робіт до уваги береться, переважно, інформація про розвиток хвороби у заданому регіоні (країні, штаті, області тощо), але не враховується її розвиток в інших, передусім, сусідніх, регіонах. А у тих роботах (див., наприклад, [6-8]), де це враховується, або робляться спроби максимально врахувати кількість туристів з кожної країни (але важко за відкритими даними відслідкувати хто прибув напряму звідти, а хто – транзитом) з використанням кореляційного аналізу, який є дуже чутливим до законів розподілу величин, що рідко бувають розподіленими за нормальним або, хоча б, логарифмічно-нормальним зако-

нами [6]. Або автори намагаються надто детально врахувати велику кількість факторів, але констатують, що відсутні точні дані про перетин сухопутного кордону жителями, наприклад, країн Африки, що унеможливує точний кількісний аналіз взаємовпливу країн [7]. Або, аналогічно, враховують тільки авіаперевезення, але ігнорують долю транзитних пасажирів та й інші види перетину кордону громадянами, які важко оцінити, а тому складно кількісно порахувати [8].

У роботі [9] у вигляді побудованих з інтервалом в 1-2 тижні картограм показана послідовність появи хвиль у країнах Європи. Досить добре видно, що хвиля починається у країнах з найбільш потужними аеропортами, які мають прямі рейси з найбільшою кількістю країн світу, потім вона починається в сусідніх країнах, а потім поширюється в інші країни, у т.ч. Україну. Отже, якщо побудувати модель, яка враховує зв'язки між країнами (або, наприклад, областями однієї країни), тоді, у разі початку хвилі в одній із них, можна досить впевнено стверджувати, що незабаром хвиля почнеться і в її країнах-сусідах.

Як відомо, проблема коронавірусу в тому, що симптоми проявляються не одразу. Більше того, ідентифікувати факт зараження теж не можна одразу. Чимало людей можуть заразитись на шляху до чи від лабораторії, де робили тест, і потім 3 доби усіх заражати, маючи на руках негативний тест (термін дії такого висновку – 72 години). Власне, так і відбувається. Тому карантинні заходи, спрямовані на вимогу пропускати в аеропорту тільки тих, в кого є сертифікат про вакцинацію та негативний тест про наявність хвороби протягом останніх 72 годин, не можуть повністю стримати її поширення, хоча, звичайно, дещо стримують її.

Одна з методологій побудови моделей, які враховують взаємовплив одних об'єктів на інші за умов невизначеності за експертними оцінками, є побудова когнітивних моделей [10-12]. Якщо розглядати ряд значень кількості нових хворих по кожному регіону як результат когнітивного моделювання, тоді можна спробувати відновити ваги когнітивної карти, за якою можна отримати такий результат. А тоді, якщо мати достатньо адекватну когнітивну карту, побудовану на попередніх хвилях коронавірусу, можна, у першому наближенні, її використати для прогнозування параметрів наступних хвиль по хвилях одного із регіонів-сусідів.

Мета

Метою статті є підвищення точності прогнозування дат старту, піку та завершення хвиль коронавірусу у заданому регіоні за даними регіонів-сусідів.

Задачі

1. Розробити математичний апарат методу відновлення ваг когнітивної карти за рядами значень, щодо яких висувається гіпотеза про те, що вони є результатами моделювання за нею.
2. Розробити алгоритм застосування методу відновлення ваг когнітивної карти до прогнозування хвиль коронавірусу у заданих регіонах.
3. Навести приклад для перевірки працездатності запропонованого методу та алгоритму.

Розв'язання задач

Як відомо, когнітивна карта — це орієнтований граф, який пов'язує вершини-змінні ребрами з вагами, значення яких є незмінними і знаходяться в діапазоні $[-1, 1]$ [10-12]. Такий граф враховує взаємовпливи приросту значень змінних у вершинах. На рис. 1 наведено варіанти когнітивних карти 2-го і 3-го порядків. Їх прийнято позначати як КК(2) та КК(3), відповідно.

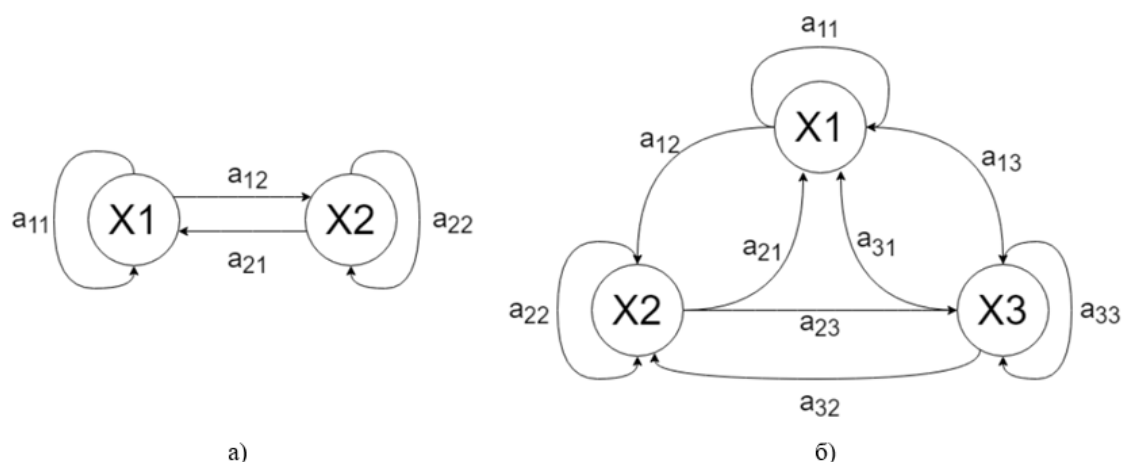


Рисунок 1 – Приклади вигляду когнітивних карти 2-го та 3-го порядку: а) КК(2); б) КК(3)

Процес когнітивного моделювання основний на використанні матриці зв'язності A , яка містить ваги усіх ребер графу КК. Наприклад, для КК(2) вона матиме вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де a_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) — ваги когнітивної карти, тобто значення у діапазоні $[-1, 1]$.

Важливо, щоб КК була стійкою, для цього жодне із власних чисел матриці (1) не повинне за модулем перевищувати 1 [10-12].

Для моделювання на вхід однієї (або декількох) вершин подається приріст значення:

$$X[0] = B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де b_1, b_2 — деякі значення, які подаються на вхід (часто одне береться як 10% або 0,1, а інші — 0, але й усі значення можуть бути відмінними від нуля).

А тоді модель дозволяє обчислити як, внаслідок подання (2) на вхід КК(2), зміняться значення усіх інших вершин у наступні моменти часу $t = 1, 2, \dots$:

$$\begin{aligned} X[1] &= A * X[0] = A * B, \\ X[2] &= A * X[1] = A^2 * B, \\ &\dots \end{aligned} \quad (3)$$

Для розв'язання поставленої задачі відновлення ваг когнітивної карти слід розв'язати зворотню задачу. Дано значення X , а значення A є невідомими. Якщо припустити, що значення X точно відповідають КК(2), тоді виведемо систему рівнянь для обчислення 4-х невідомих параметрів матриці A :

$$\begin{cases} A * X[0] = X[1], \\ A * X[1] = X[2], \end{cases} \quad (4)$$

або

$$\begin{bmatrix} x_1[0] & x_2[0] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1[0] & x_2[0] \\ x_1[1] & x_2[1] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1[1] & x_2[1] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{21} \\ a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1[1] \\ x_2[1] \\ x_1[2] \\ x_2[2] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) можна знайти усі значення ваг матриці A (1). У разі ж, якщо ми не знаємо напевне чи дійсно ряди значень є результатом моделювання по певній КК, тоді варто брати до уваги не 4 рівняння по перших 2-х значеннях вектор-стовпців $X[0], X[1]$, а — більшу кількість при $t = 2, 3, \dots$, а тоді значення ваг матриці A знаходити за методом найменших квадратів.

Отже, для випадку КК(2) для знаходження $2*2=4$ невідомих ваг матриці A потрібна система рівнянь (4), в якій X — це вектор-стовпці, розмірністю 2. Легко показати, для випадку КК(3) для знаходження $3*3=9$ невідомих ваг матриці A потрібна система рівнянь, аналогічна до (4), але із 3 рівнянь і в якій X — це вектор-стовпці, розмірністю 3. Аналогічно, для випадку КК(n) для знаходження $n*n$ невідомих ваг матриці A потрібна система рівнянь, аналогічна до (4), але із n рівнянь і в якій X — це вектор-стовпці, розмірністю n . Для реального випадку, потрібна більша кількість рівнянь, ніж n , відповідно до вимог методу найменших квадратів.

Перевірка цього методу відновлення ваг когнітивної карти з використанням програми на Python довела його працездатність. Для розв'язання системи рівнянь (5), а також для варіанту при $t = 0, 1, 2, 3$, був використаний метод найменших квадратів, реалізований у бібліотеці NumPy: «numpy.linalg.lstsq()».

Отже, перша із поставлених задач розв'язана. Перейдемо до алгоритму застосування запропонованого методу на практиці. Розглянемо його на рівні країн (для областей, штатів, міст та ін. регіонів алгоритм є аналогічним). Алгоритм застосовується послідовно у ряд етапів.

Етап 1. Видобути дані про кількість підтверджених нових хворих на коронавірус по заданих регіонах (країнах). Існує чимало відкритих даних з такою інформацією, наприклад, одним із найбільш популярних є датасет Університету Джона Хопкінса (США) [13,14], який містить більше сотні щодобових значень ознак по усіх країнах світу за 2020-2021 рр. (оновлюється щодобово). Відібрати дані тільки по тих країнах (не менше 2-х), по яких планується побудова когнітивної карти. Прибрати пропущені дані (можна здійснити їх інтерполяцію по сусідніх значеннях або просто видалити). Прибрати чи згладити помилкові значення (по деяких країнах у свята чи вихідні дані не оприлюднюються, натомість, у понеділок надаються значення одразу за 2 дні, тобто замість 100%, 100% — 0, 200%, що ускладнює аналіз).

Етап 2. Згладити дані (наприклад взяти ковзне середнє з тижневим вікном, тобто у 7 днів) та знайти дати старту, піку і завершення хвилі. Можна встановити поріг у певну кількість хворих (наприклад, по Україні – 1000 нових хворих на день) або 20% від пікового значення, щоб тільки такі значення, які вищі такого порогового, вважати належними певній хвилі, решту (якщо значення після певної дати жодного разу не долають поріг) вважати – міжхвиловими значеннями. Цей етап був алгоритмізований на Python. Для визначення початку та кінця хвилі кількості підтверджених випадків захворювання COVID-19 був використаний підхід з пошуку відносних максимумів та мінімумів, саме цей метод використовується функцією `argrelextrema` бібліотеки `SciPy`. В основі даного методу лежить пошук точок, де функція змінює напрямок від збільшення до зменшення (у випадку відносного максимуму) та, аналогічно, точок, де функція змінює напрямок від зменшення до збільшення. Такий підхід, у першу чергу, залежить від окреслення інтервалів зростання та спадання функції, після чого визначаються точки, де функція змінює свій напрямок. У свою чергу, функція `argrelextrema` приймає декілька параметрів, а саме: набір даних, в якому буде відбуватись пошук відносних максимумів/мінімумів, функція-компаратор, за допомогою якої здійснюється порівняння значень набору даних (для цього можна скористатись функцією `less_equal` та `greater_equal` бібліотеки `NumPy`, для мінімумів та максимумів, відповідно), а також обрати кількість елементів, яка буде використовуватись компаратором для визначення змін в напрямку зростання або спадання значень набору даних. Частина коду, що займається визначенням відносних максимумів та мінімумів наведено на рисунку 2.

```
def advanced_wave_dates_search(df, col, country):
    # Get the start and peak dates of waves - advanced search

    POLYORDER = 24
    MIN_PEAK_NUM_CASES = 1000
    cases_array = df[col].values

    ilocs_min = list(argrelextrema(df[col].values, np.less_equal, order=POLYORDER)[0])
    ilocs_max = list(argrelextrema(df[col].values, np.greater_equal, order=POLYORDER)[0])

    largest_peaks = list(filter(lambda idx: cases_array[idx] > MIN_PEAK_NUM_CASES,
                                ilocs_max))
    max_dict = [{"val": num, "extreme": "max"} for num in largest_peaks]
    min_dict = [{"val": num, "extreme": "min"} for num in ilocs_min]
    max_dict.extend(min_dict)
    sorted_max_dict = sorted(max_dict, key=lambda item: item["val"])

    closest_mins = []
    for index, item in enumerate(sorted_max_dict):
        peak = item["val"]
        if item["extreme"] == "max":
            start_wave_index = sorted_max_dict[index-1]["val"]
            closest_mins.append(start_wave_index)
```

Рисунок 2 – Фрагмент коду на Python для визначення початку/кінця хвилі захворюваності на COVID-19

Таким чином, знаходяться піки хвиль (відносні максимуми), після чого обираються найбільш вірогідні відносні мінімуми, а тоді відбираються мінімуми у місцях, де хвиля вже починає долати мінімальний поріг (дата старту хвилі) або вже перестає його долати (дата завершення хвилі).

Етап 3. Усереднити дані для побудови когнітивних карт. Проведене авторами дослідження показує, що для різних ділянок хвилі (зростання, різке зростання, «плато», різке спадання, спадання) мають місце різні варіанти когнітивних карт. І їх ваги є досить мінливими. А оскільки метою побудови моделі КК є прогнозування, то варто узагальнювати дані, наприклад за 1-2 тижні, тоді мінімум на 1-2 тижні можна буде робити прогноз того, як зміниться значення в одному регіоні (країні чи ін.) після їх зміни в іншому, в якому хвилі з'являються раніше. Саме в цьому полягає ідея застосування запропонованого методу: для того, щоб прогнозувати старт/пік/спад хвилі у заданому регіоні, треба знайти регіон(и), де ці події мають місце раніше, ідентифікувати для них когнітивну карту і тоді по ній здійснювати прогнозування цього процесу.

Етап 4. Відібрати в часі дані для ідентифікації когнітивних карт. Як перший момент часу пропонується дата початку хвилі у регіоні, в якому коронавірус з'являється першим, а як останній момент часу для моделювання пропонується або поточний момент часу, або дата завершення хвилі у регіоні, в якому вона завершується останньою.

Етап 5. Масштабувати дані, щоб вони не перевищували 1. Пропонується замінити усі значення на їх відносні від максимального значення відповідної хвилі у кожному регіоні окремо (або максимальне значення за весь період спостережень).

Етап 6. Ідентифікувати когнітивні карти для різних ділянок наявних хвиль. На цьому етапі найважливішим є перевірка двох ключових для когнітивних карт умов:

- 1) Чи є КК стійкою?
- 2) Чи є усі знайдені ваги не більшими за 1?

У разі невиконання першої умови когнітивну карту не можна використовувати для моделювання і варто пробувати використовувати інший часовий інтервал для усереднення, брати інший набір регіонів-сусідів, застосовувати якесь інше передоброблення даних чи ін. Якщо це усе не допоможе, тоді – зробити висновок, щоб для даного випадку цей метод застосувати не можна, оскільки має місце вплив факторів, які ігноруються такою моделлю, тобто міжрегіональний вплив не є домінуючим.

У разі невиконання другої умови для стійкої КК, варто зробити висновок про те, що треба зменшувати крок інтервалу часу, за яких слід робити усереднення, оскільки реакція зв'язків є надто миттєвою.

Етап 7. Ідентифікувавши КК, здійснити моделювання за нею, взявши за початкові значення ті значення, які мали місце на початку інтервалу часу, за який здійснювалась ідентифікація. Порівняти отримані результати моделювання із реальними значеннями.

Продемонструємо працездатність запропонованого методу та алгоритму на прикладі. Пропонуємо вибрати дві країни: Румунія та Україна. На рис. 3 наведено дані щодобових приростів кількості нових підтверджених хворих у цих країнах з відомого сервісу <https://covid19.healthdata.org/>

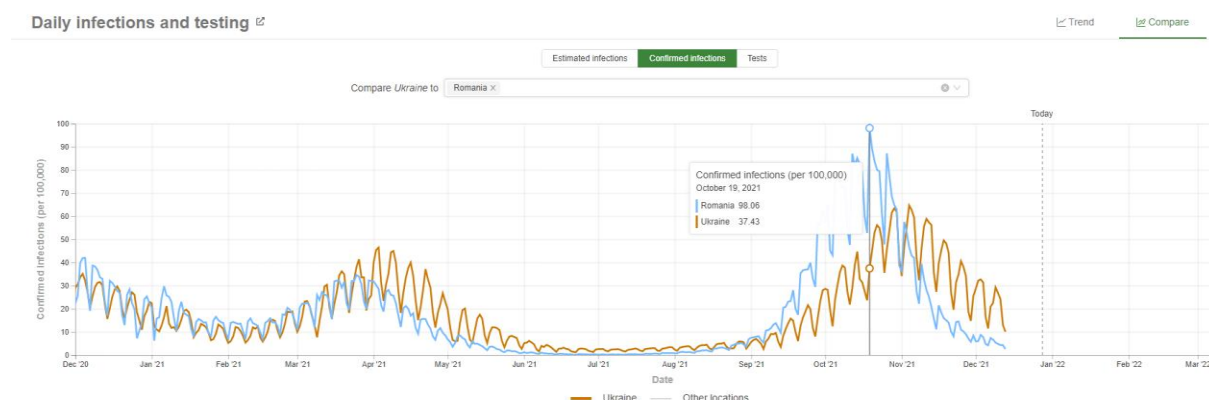


Рисунок 3 – Хвилі з щодобовими приростами кількості нових підтверджених хворих в Україні та Румунії за 2020-2021 рр. (<https://covid19.healthdata.org/>)

Як видно, з рис. 3, хвилі у Румунії останнім часом випереджають хвилі в Україні, а тому, у першому наближенні, їх дані можна використати для прогнозування хоча б дат піку та спадання хвиль в Україні.

Для прикладу були відібрані останні 2 місяці значень з 25.10.2021 р. (рис. 4).

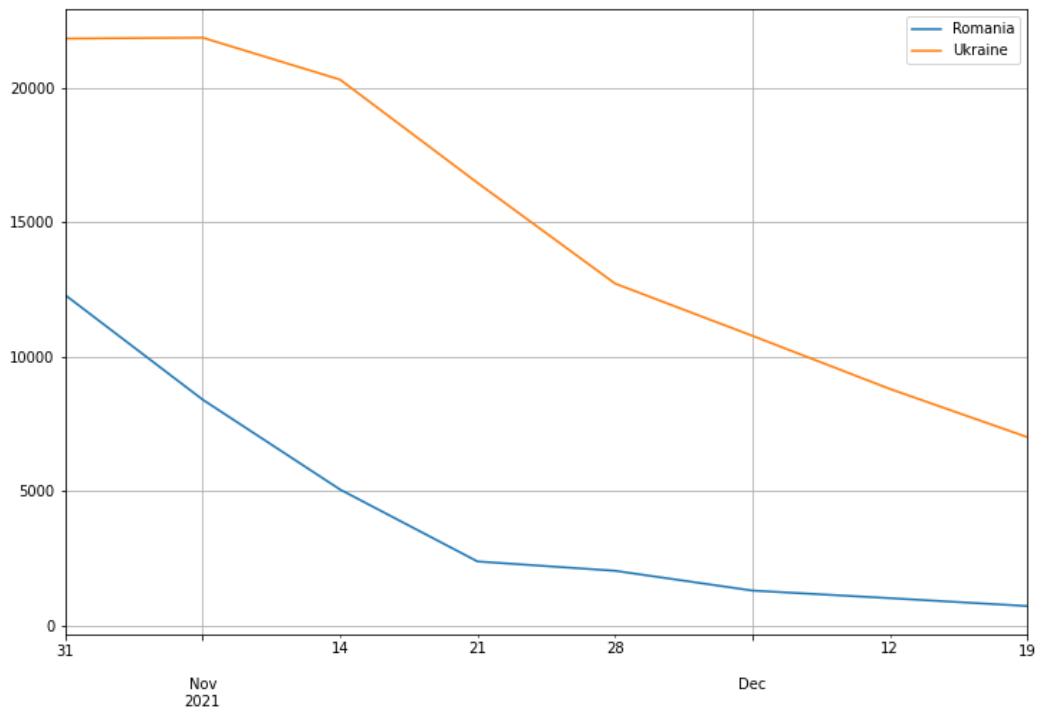


Рисунок 4 – Реальні дані середніх за тиждень значень щодобових приростів кількості нових підтверджених хворих в Україні та Румунії за 25.10-19.12.2021 рр. (завершення «дельта-хвилі»)

За даними, проілюстрованими на рис. 4, побудовано серію когнітивних карт за кожною парою дат. Їх значення ваг та найбільші власні числа проілюстровані на рис. 5.

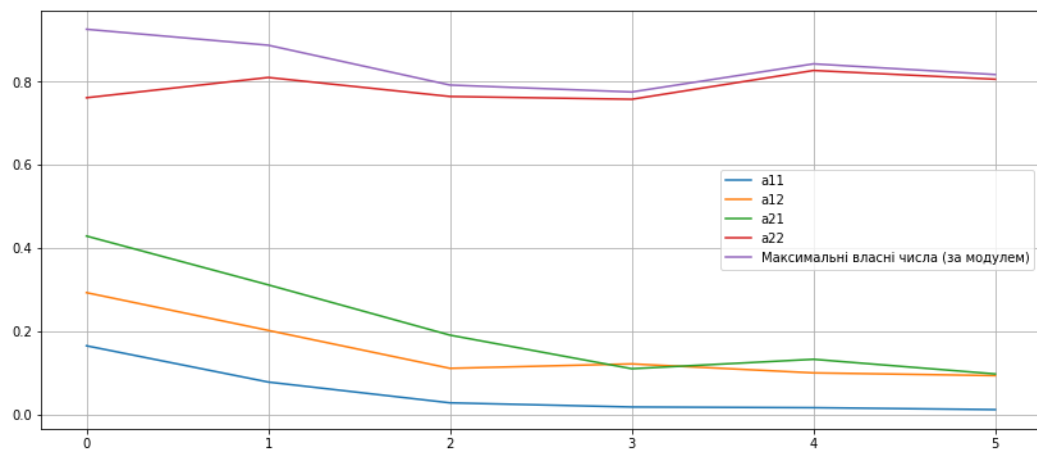


Рисунок 5 – Значення серії когнітивних карт, побудованих для пар послідовних тижнів зі значеннями з рис. 4, та максимальні значення власних чисел (за модулем)

Як видно з рис. 5, обидві вимоги етапу 6 виконуються — усі ваги є меншими за 1 і усі максимальні власні числа за модулем є теж меншими 1. Отже, усі когнітивні карти є коректними і стійкими. А тому, їх можна використати для моделювання, результат якого наведено на рис. 6.

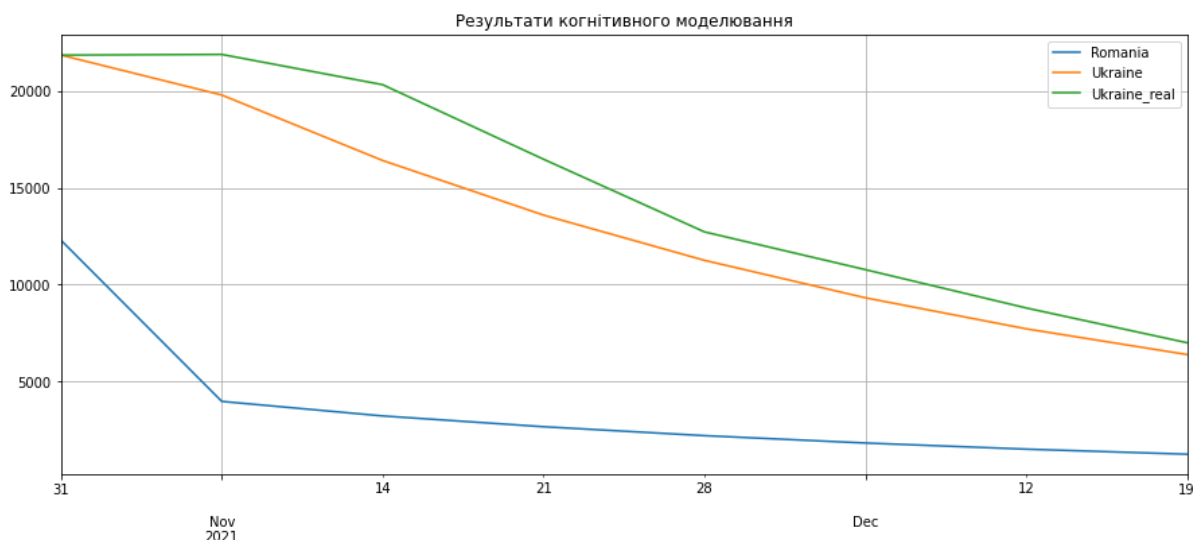


Рисунок 6 – Порівняння результатів моделювання з реальними даними з рис. 4

Як видно на рис. 6, збіг результатів моделювання з реальними даними – прийнятний. Отже, усі задачі розв'язані.

Висновки

У статті запропоновано прогнозувати хвилі кількості щодобових приростів кількості підтверджених хворих на коронавірус у заданому регіоні на основі когнітивної карти, яка враховує міжрегіональний вплив, тобто інших регіонів на заданий, і – навпаки. Розроблено метод відновлення ваг когнітивної карти на основі рядів даних щодо яких висловлена гіпотеза щодо того, що вони можуть бути результатом моделювання за цією когнітивною картою. Зазначено ситуації, коли ця гіпотеза не підтверджується і когнітивна карта або ідентифікується як нестійка, або з вагами, більшими за одиницю, та запропоновано які прийоми можна застосовувати за таких умов.

Запропоновано поетапний алгоритм застосування методу відновлення ваг когнітивної карти до прогнозування хвиль коронавірусу у заданих регіонах. Приділено увагу питання підготовки даних до моделювання і видобування параметрів хвиль (дата початку, піку та завершення) та автоматизації цих операцій на реальних даних з використанням Python.

Наведено приклад для перевірки працездатності запропонованих методу та алгоритму на прикладі аналізу взаємовпливу та прогнозування дати завершення хвилі коронавірусу в Україні за даними по Румунії на основі відновлених ваг когнітивної карти 2-го порядку.

Список літератури

- [1] В. Б. Мокін, А. В. Лосенко, і А. Р. Ящолт, «Інформаційна технологія аналізу та прогнозування кількості нових випадків захворювань на коронавірус SARS-COV-2 в Україні на основі моделі Prophet,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 5, с. 71–83. 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-71-83>.
- [2] В. Б. Мокін, А. В. Лосенко, і А. Р. Ящолт, «Інформаційна технологія аналізу та прогнозування багатохвильової кількості нових випадків захворювань на коронавірус COVID-19 на основі моделі Prophet,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 6, с. 65–75. 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-65-75>.
- [3] І. Бровченко, «Розробка математичної моделі поширення епідемії COVID-19 в Україні,» *Світосгляд*, №2 (82), с. 2-14. 2020.
- [4] C.L. Althaus, Real-time modeling and projections of the COVID-19 epidemic in Switzerland, Institute of Social and Preventive Medicine, University of Bern, Switzerland, 20 April 2020. [Online]. Available: <https://ispmbern.github.io/covid-19/swiss-epidemic-model>.
- [5] M.H.D.M. Ribeiro, R.G. da Silva, J.H.K. Larcher, V.C. Mariani, L.S. Coelho, “Ensemble Learning Models Coupled with Urban Mobility Information Applied to Predict COVID-19 Incidence Cases,» *Modeling, Control and Drug Development for COVID-19 Outbreak Prevention. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 366, pp. 821-858. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72834-2_24.
- [6] M. R. Farzanegan, H. F. Gholipour, M. Feizi, R Nunkoo., and A. E. Andargoli, “International tourism and outbreak of coronavirus (COVID-19): A cross-country analysis,» *Journal of Travel Research*, vol. 60, №3, p. 687-692, 2021. <https://doi.org/10.1177/0047287520931593>

- [7] P. Ssentongo et al., "Pan-African evolution of within-and between-country COVID-19 dynamics," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, №28. 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2026664118>.
- [8] O. A. Adegbeye et al., "Change in outbreak epicentre and its impact on the importation risks of COVID-19 progression: A modelling study," *Travel Medicine and Infectious Disease*, vol. 40, 101988. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2021.101988>.
- [9] В. Б. Мокін, і А. В. Лосенко, «Картування тренду тижневих прогнозів за моделлю Facebook Prophet зміни кількості нових хворих на коронавірус у країнах Європи протягом січня-березня 2021 року,» *L науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 10-12 березня, 2021 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/view/12849>.
- [10] В. Б. Мокін, О. В. Бурдейна, К. О. Коваль, і А. Р. Ящолт, «Метод проектування когнітивної карти для оптимізації профорієнтаційної діяльності ЗВО,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №3, с. 89–99, Черв. 2018.
- [11] В. Д. Романенко, и Ю. Л. Милявский, «Синтез следящей системы управления неустойчивыми импульсными процессами в иерархических когнитивных картах сложных систем,» *Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу*, №4, с.7-13. 2016. <http://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2016.4.01>.
- [12] В. Д. Романенко, и Ю. Л. Милявский, «Обеспечение устойчивости импульсных процессов в когнитивных картах на основе моделей в пространстве состояний,» *Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу*, №1, с. 26-42. 2014.
- [13] O. Wahltinez et al., COVID-19 Open-Data: curating a fine-grained, global-scale data repository for SARS-CoV-2. [Online]. Available: <https://goo.gl/covid-19-open-data>.
- [14] Ensheng Dong, Hongru Du, and Lauren Gardner, "An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time," *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 20, №5, p. 533–534. 2020. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30120-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30120-1).

Стаття надійшла: 24.11.2021.

References

- [1] V. B. Mokin, A. V. Losenko, і А. R. Yashcholt, «Informatsiina tekhnolohiia analizu ta prohnozuvannia kilkosty novykh vypadkiv zakhvoriuvan na koronavirus SARS-COV-2 v Ukraini na osnovi modeli Prophet,» *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, vyp. 5, s. 71–83. 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-71-83> [in Ukrainian].
- [2] V. B. Mokin, A. V. Losenko, і А. R. Yashcholt, «Informatsiina tekhnolohiia analizu ta prohnozuvannia bahatokhvylovoi kilkosty novykh vypadkiv zakhvoriuvan na koronavirus COVID-19 na osnovi modeli Prophet,» *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, vyp. 6, s. 65–75. 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-65-75> [in Ukrainian].
- [3] I. Brovchenko, «Rozrobka matematychnoi modeli poshyrennia epidemii COVID-19 v Ukraini,» *Svitohliad*, №2 (82), s. 2-14. 2020 [in Ukrainian].
- [4] C.L. Althaus, Real-time modeling and projections of the COVID-19 epidemic in Switzerland, Institute of Social and Preventive Medicine, University of Bern, Switzerland, 20 April 2020. [Online]. Available: <https://ispmbern.github.io/covid-19/swiss-epidemic-model>.
- [5] M.H.D.M. Ribeiro, R.G. da Silva, J.H.K. Larcher, V.C. Mariani, L.S. Coelho, "Ensemble Learning Models Coupled with Urban Mobility Information Applied to Predict COVID-19 Incidence Cases," *Modeling, Control and Drug Development for COVID-19 Outbreak Prevention. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 366, pp. 821-858. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72834-2_24.
- [6] M. R. Farzanegan, H. F. Gholipour, M. Feizi, R Nunkoo., and A. E. Andargoli, "International tourism and outbreak of coronavirus (COVID-19): A cross-country analysis," *Journal of Travel Research*, vol. 60, №3, p. 687-692, 2021. <https://doi.org/10.1177/0047287520931593>
- [7] P. Ssentongo et al., "Pan-African evolution of within-and between-country COVID-19 dynamics," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, №28. 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2026664118>.
- [8] O. A. Adegbeye et al., "Change in outbreak epicentre and its impact on the importation risks of COVID-19 progression: A modelling study," *Travel Medicine and Infectious Disease*, vol. 40, 101988, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2021.101988>.
- [9] V. B. Mokin, і А. V. Losenko, «Kartuvannia trendu tyzhnevnykh prohnoziv za modelliu Facebook Prophet zmyny kilkosty novykh khvorykh na koronavirus u krainakh Yevropy protiahom sichnia-berезnia 2021 roku,» *L naukovo-tekhnichna konferentsiia pidrozdiliv VNTU*, Vinnytsia, 10-12 bereзnia, 2021 r. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2021/paper/view/12849> [in Ukrainian].

- [10] V. B. Mokin, O. V. Burdeina, K. O. Koval, i A. R. Yashcholt, «Metod proektuvannia kohnityvnoi karty dlia optymizatsii proforiientatsiinoi diialnosti ZVO,» *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, №3, s. 89–99, Cherv. 2018 [in Ukrainian].
- [11] V. D. Romanenko, i Ju. L. Miljavskij, «Sintez sledjashhej sistemy upravlenija neustojchivymi impul'snymi processami v ierarhicheskikh kognitivnyh kartah slozhnyh sistem,» *Teoretichni ta prikladni problemi i metodi sistemnogo analizu*, №4, s.7-13. 2016. <http://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2016.4.01> [in Russian].
- [12] V. D. Romanenko, i Ju. L. Miljavskij, «Obespechenie ustojchivosti impul'snyh processov v kognitivnyh kartah na osnove modelej v prostranstve sostojanij,» *Teoretichni ta prikladni problemi i metodi sistemnogo analizu*, №1, s. 26-42. 2014 [in Russian].
- [13] O. Wahltinez et al., COVID-19 Open-Data: curating a fine-grained, global-scale data repository for SARS-CoV-2. [Online]. Available: <https://goo.gl/covid-19-open-data>.
- [14] Ensheng Dong, Hongru Du, and Lauren Gardner, “An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time,” *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 20, №5, p. 533–534. 2020. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30120-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30120-1).

Відомості про авторів

Мокін Віталій Борисович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Дратованій Михайло Володимирович – асистент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Лосенко Арсен Володимирович – аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Жуков Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

V. B. Mokin, M. V. Dratovanyj, A. V. Losenko, S. O. Zhukov

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЛН КОРОНАВИРУСА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕСОВ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ ДЛЯ УЧИТАНИЯ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ

Винницький національний технічний університет, Вінниця

V. B. Mokin, M. V. Dratovanyi, A. V. Losenko, S. O. Zhukov

PREDICTION OF CORONAVIRUS WAVES BASED ON THE METHOD OF WEIGHT RECOVERY OF THE COGNITIVE MAP TO TAKE INTO ACCOUNT FOR INTERREGIONAL INFLUENCE

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Найновіші правила оформлення і подання статей знаходяться на сайті журналу
<http://itce.vntu.edu.ua/>