

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

У статті розглянуто розробку та реалізацію математичної моделі персоналізованого оцінювання очікуваної тривалості життя населення України. Запропонована модель враховує демографічні, медичні та соціально-поведінкові фактори, специфічні для українського суспільства. Запропоновано нову інтегровану методiku з використанням коефіцієнтів впливу індивідуальних факторів на виживання. Наведено практичні результати апробації моделі та перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: математична модель, тривалість життя, медична кібернетика, програмне забезпечення, інформаційні технології, Україна.

© В.Ю. Маланін, І.А. Чайковський, 2025

УДК 519.861.3

DOI:10.34229/2707-451X.25.2.4

В.Ю. МАЛАНІН, І.А. ЧАЙКОВСЬКИЙ

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ОЦІНЮВАННЯ ОЧІКУВАНОЇ ТРИВАЛОСТІ ЖИТТЯ В УКРАЇНІ

Вступ. Проблема персоналізованого прогнозування тривалості життя – це одна з ключових задач сучасної медичної кібернетики, особливо важлива в умовах складних демографічних та соціальних викликів, які нині актуальні в Україні. Точні прогнози життєвого циклу людини дають змогу краще планувати медичні, соціальні та економічні ресурси країни, ефективно впроваджувати профілактичні та реабілітаційні програми для різних верств населення.

Демографічна ситуація в Україні останніми роками суттєво погіршилася через війну, пандемію COVID-19 та економічні негаразди [1]. Це призвело до зниження середньої тривалості життя та збільшення поширеності таких факторів, як посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) і внутрішнє переміщення населення. Ідея створення опитувальника для розрахунку очікуваної тривалості життя для українського населення була запропонована Центром громадського здоров'я Міністерства охорони здоров'я України, за підтримки якого у 2021 році успішно розроблено та запущено інструмент під назвою «Калькулятор життя». Він оцінює очікувану тривалість життя на основі демографічних, соціальних та медичних факторів, специфічних саме для України. Його актуальність для українського населення зростає в умовах військового стану та демографічної кризи. Проблема розрахунку очікуваної тривалості життя – критично важливий напрямок досліджень, особливо з огляду на вплив різноманітних факторів на тривалість життя [2, 3].

«Калькулятор життя» враховує медичні показники, спосіб життя, звички, соціальні чинники та інші параметри, що впливають на тривалість життя. Цей підхід дозволяє оцінити поточний стан здоров'я та стимулює зміни у способі життя для покращення якості та тривалості життя.

Мета цієї статті – детальне представлення та обґрунтування методології розрахунку індивідуальної тривалості життя з урахуванням унікальних факторів, специфічних для українського населення.

Найбільшою популярністю у міжнародних проєктах користується модель Mortality Population Risk Tool (MPoRT) [4], яка входить до складу проєкту Big Life [5], який дозволяє оцінити вплив шкідливих звичок на тривалість життя, забезпечуючи багатофакторний прогностичний підхід для кількісної оцінки скорочення тривалості життя через куріння, вживання алкоголю, низьку фізичну активність та нездорове харчування. Серед класичних моделей варто відокремити модель Lee-Carter, яка базується на сингулярному розкладі матриці вікових коефіцієнтів смертності та дозволяє прогнозувати зміни смертності з часом [6].

Певної уваги заслуговують також глобальні моделі та концепції здорової тривалості життя [7], які розширюють показники очікуваної тривалості життя з урахуванням розподілу стану здоров'я населення. В українських же реаліях, зважаючи на значно нижчу середню тривалість життя порівняно з західними країнами, існуючі моделі не відповідають сучасним потребам точного прогнозування довголіття. Важливо підкреслити неможливість точного розрахунку чи навіть приблизного прогнозування без врахування місцевих та актуальних факторів саме для України, навіть на основі даних сусідніх європейських країн [8].

Наукова мета дослідження розробка вдосконаленої технології для максимально обґрунтованого розрахунку очікуваної тривалості життя населення України. Ця технологія має інтегрувати сучасні підходи до розрахунків та враховувати спосіб життя, тривалість життя і медичні умови, характерні та актуальні саме для населення України, для отримання точніших і реалістичніших прогнозів тривалості життя.

Практична мета – створення інструменту, який можна використовувати у сфері охорони здоров'я та соціального планування в Україні для розробки ефективних стратегій покращення громадського здоров'я та якості життя.

Завдання дослідження були сформульовані таким чином:

1. Проаналізувати сучасні методи та підходи до прогнозування тривалості життя.
2. Визначити та формалізувати основні демографічні, соціальні та медичні фактори для побудови інтегрованої моделі прогнозування.
3. Розробити математичну модель персоналізованого прогнозування на основі інтеграції різних типів даних та сучасних алгоритмів машинного навчання.
4. Створити алгоритми адаптивного прогнозування з урахуванням специфіки українського населення, зокрема в кризових умовах.
5. Реалізувати розроблену модель у вигляді практичного веб-застосунку та провести експериментальне дослідження на реальних даних українського населення.
6. Оцінити ефективність, точність та зручність запропонованої технології, а також визначити перспективні напрями її розвитку.

«Калькулятор життя» має окрему ймовірність виживання для українського населення та коефіцієнт впливу для кожного віку та статі. Коефіцієнти впливу коригують абсолютні значення персональних факторів впливу окремо для кожного віку та статі. Мінімальний вік для визначення ймовірності виживання становить 18 років, а максимальний становить 110 років. Основні дані для розрахунків були взяті зі статистики Глобальних оцінок здоров'я (Global Health Estimates, GHE) ВООЗ щодо середньої очікуваної тривалості життя в Україні, яка за даними 2019 року становила 68 років для чоловіків та 78 років для жінок.

Методологія та математична модель у порівнянні. Запропонована модель «Калькулятор життя» суттєво відрізняється за методологією та математичним підходом від моделей MPoRT та Lee-Carter.

MPoRT базується на пропорційній моделі ризиків Кокса, яка дозволяє розрахувати ризик втрати очікуваної тривалості життя через поведінкові та соціально-економічні фактори. Загальний вигляд цієї моделі можна записати як $P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}}$, де P – ймовірність дожиття; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ – коефіцієнти моделі, які оцінюються на основі даних; $X_1, X_2, \dots, X_n$ – значення предикторів (факторів ризику). На практиці для обчислення ризику смерті MPoRT було реалізовано у вигляді прогностичного алгоритму (PMML-файл), що безпосередньо використовує оцінений базовий ризик та коефіцієнти β з моделі Кокса. Зокрема, обчислюється прогностичний бал ризику як сума коефіцієнтів на значення коваріат. Потім на основі цього бала ризику та базової інтенсивності обчислюється прогнозований річний ризик смерті. Модель представлена у дискретизованій формі: для кожного року віку розраховується ймовірність померти протягом цього року залежно від балів на початку року.

Модель Lee-Carter базується на статистичних методах агрегованого аналізу даних смертності населення. Її основу становить сингулярний розклад матриці вікових коефіцієнтів смертності, який дозволяє моделювати лише загальні демографічні тенденції без персональної деталізації, і не враховує медичні, поведінкові або соціальні індивідуальні параметри. Ця модель орієнтована на загальні тренди, не включає індивідуальні медичні дані, та може бути представлена наступним чином: $\ln(m_{x,t}) = a_x + b_x k_t + \varepsilon_{x,t}$, де $m_{x,t}$ – рівень смертності для віку x у рік t ; a_x – середнє значення рівня смертності за віком x ; b_x – вікова залежність на зміни загального рівня смертності; k_t – індекс, що відображає зміну рівня смертності з часом; $\varepsilon_{x,t}$ – залишки (помилка) моделі.

На відміну від цих підходів, модель «Калькулятор життя» застосовує персоналізовану інтегровану методологію, в якій враховуються індивідуальні медичні (діагностичні) та соціально-поведінкові (недіагностичні) фактори:

$$P_i = B_{si} + K_{si} \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_{nd}} P_{ndj} + C \cdot N_d \sum_{k=1}^{N_d} P_{dk} \right), \quad (1)$$

де P_i – персональна ймовірність виживання у віці i , B_{si} – базова ймовірність виживання за статтю s та віком i , K_{si} – коефіцієнт впливу факторів за статтю s та віком i , P_{ndj} – вплив окремого недіагностичного фактора, C – константа (експериментально визначена 0,61), N_d – кількість діагностичних факторів, P_{dk} – вплив окремого діагностичного фактора.

Як і MPoRT, методологія розрахунку враховує наступні фактори: демографічні, звичок, соціально-демографічні та медичні стани. Однак, на відміну від MPoRT, «Калькулятор життя» має єдину концепцію розрахунку фактора впливу для кожного віку і не використовує окремі категорії впливу через брак належних дослідницьких даних для специфічних груп населення України. У розрахунках фактори можна умовно поділити на соціально-поведінкові (ті, що не пов'язані з хворобами) – недіагностичні (табл. 1), і ті, що пов'язані з ними (хвороби та медичні стани) – діагностичні (табл. 2), оскільки вплив факторів, пов'язаних із хворобами, зростає пропорційно до їх кількості. Водночас вони безпосередньо впливають на ймовірність виживання разом з іншими чинниками. Щоб мати значущу кореляцію із сучасним українським середовищем [9], до «Калькулятора життя» було включено унікальні фактори, такі як статус внутрішньо переміщеної особи (ВПО), посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) та COVID-19. Це дозволяє отримати більш контрольовані значення очікуваної тривалості життя і мінімізує ймовірність непередбачуваних результатів через брак даних щодо окремих суперечливих випадків (наприклад, відсутність будь-яких медичних станів у віці, близькому до максимального, у поєднанні з численними соціально-демографічними факторами).

ТАБЛИЦЯ 1. Недіагностичні або соціально-поведінкові параметри впливу

Параметр	Градації та коефіцієнти впливу					
Споживання здорової їжі	Відсутнє	Низьке	Помірне	Оптимальне		
	–390	–70	+420	+910		
Фізична активність	відсутня					
	–810					
Фактор ІМТ	0.5	0.75	1.25	1.5	2.0	2.5
	+1700	+200	–300	–380	–660	–980
Виклики швидкої допомоги протягом року	відсутні	один	час від часу	часті		
	+800	–30	–300	–700		
Госпіталізації протягом року	відсутні	один раз	час від часу	часті		
	+800	–30	–300	–700		
Медична допомога сімейного лікаря протягом року	відсутня	один раз	час від часу	часта		
	+800	–30	–300	–700		
Рівень освіти	відсутня	неповна середня	середня спеціальна	бакалавр	магістр	доктор
	–190	–40	–30	+170	+190	+400
Фізична активність високої інтенсивності	відсутня	мінімальна	оптимальна			
	–120	+110	+310			
Фізична активність середньої інтенсивності	відсутня	мінімальна	оптимальна			
	–140	+170	+480			
Фізична активність низької інтенсивності	відсутня	мінімальна	оптимальна			
	–220	+270	+720			
Відсутність захворювань	+2700					
Вживання алкоголю	Відсутнє та ніколи не вживав	Відсутнє	час від часу	часте	Більше	
					3	7
					пляшок міцного алкоголю на тиждень	
	+1240	+970	–30	–180	–480	–1310
Куріння	ніколи не курив	в минулому	час від часу	менше пачки	пачка і більше	
				цигарок на добу		
				–430	–1870	
			* фактор стажу куріння			
Дохід	за межею бідності	низький	нижче середнього	середній	вище середнього	
	–170	–120	–70	–10	+240	
Статус ВПО	Наявність					
	–120					

Коли респондент вирішує пропустити окремі запитання, фактор, пов'язаний із цим запитанням, не впливає на результат. Фактори, що стосуються цукрового діабету, серцевих захворювань, інсульту та гіпертонії, множаться на фактор індексу маси тіла (ІМТ), що розраховується на основі даних про зріст і вагу тіла [10], наданих респондентом, за формулою $ІМТ = \frac{\text{вага (кг)}}{\text{зріст (м)}^2}$. Окремий фактор ІМТ варіюється у межах від 0,5 до 2,5, залежно від відхилення ІМТ від норми для населення. Фактор

куріння множиться на коефіцієнт куріння, який змінюється від 1 до 2 залежно від кількості років куріння. Значення коефіцієнту куріння додатково множиться на фактор стажу куріння. При значенні стажу більше 20 років, його фактор дорівнює 2, а при стажі від 10 до 20 років – 1,25.

ТАБЛИЦЯ 2. Діагностичні або параметри впливу медичних станів та захворювань

Назва параметру впливу	Значення коефіцієнту впливу
Діабет	–670 * фактор ІМТ
Захворювання серця	–410 * фактор ІМТ
Інсульт	–400 * фактор ІМТ
Гіпертонічна хвороба	–150 * фактор ІМТ
Деменція	–710
Онкологічні захворювання	–1290
Хронічні обструктивні захворювання легень (ХОЗЛ)	–390
Епілепсія	–660
Депресія	–360
Туберкульоз	–650
ВІЛ/СНІД	–700
Посттравматичний стресовий розлад (ПТСР)	–360
COVID–19 помірного перебігу	–370
COVID–19 тяжкого перебігу	–700

Після завершення анкети створюється персоналізована версія таблиці виживання на основі загальної таблиці для відповідної статі (рис. 1), з урахуванням відповідей та факторів впливу конкретного респондента. Ця таблиця визначає персональну ймовірність щорічного виживання для доступних вікових груп шляхом розрахунку за формулою (1).

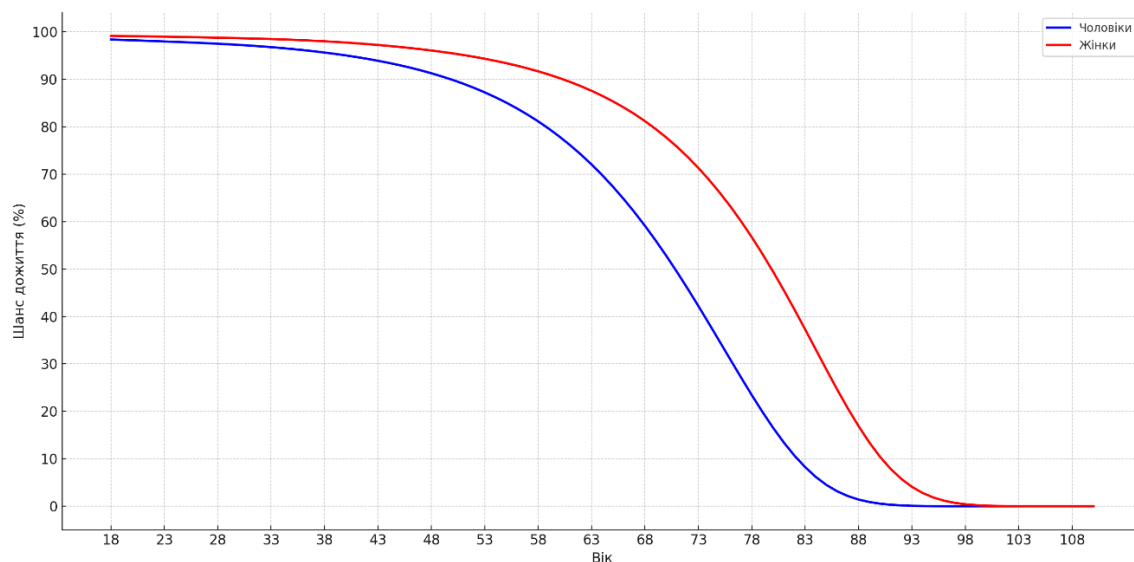


РИС. 1. Відображення таблиці базової ймовірності дожиття за віком та статтю

Таблиця коефіцієнтів впливу факторів за статтю та віком (рис. 2) були розраховані на підставі поєднаних, валідованих та екстрапольованих на українську популяцію даних з MPORT через відсутність масштабних статистичних та клінічних даних в Україні на момент розробки моделі.

Очікувана тривалість життя визначається послідовним перебором персональних імовірностей виживання з таблиці для кожного віку та визначенням найменшого віку, для якого імовірність виживання вперше стає нижчою за 60 %. Такий підхід базується на повних таблицях смертності Держстату України (2020 р.), і забезпечує практично аналогічний результат до офіційно опублікованої середньої очікуваної тривалості життя. Це робить показник більш наочним і зрозумілим для широкого кола користувачів при мінімальних відхиленнях від офіційних статистичних стандартів. Алгоритм можна виразити наступним чином:

$$E_x = \min\{\text{age} : P(\text{survival}) < 60\%, \quad (2)$$

де E_x – очікувана тривалість життя для особи віком x ; $P(\text{survival})$ – персональна ймовірність виживання на відповідний вік (береться з персональної таблиці виживання); 60 % – порогове значення, визначене для розрахунку очікуваної тривалості життя відповідно до методики.

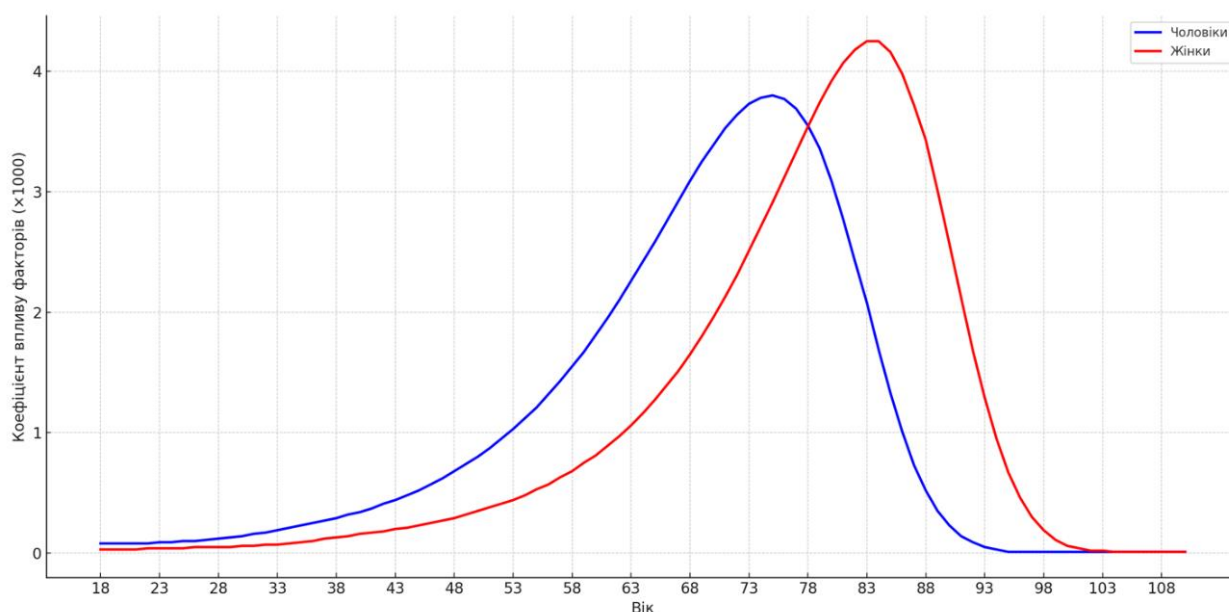


РИС. 2. Відображення таблиці коефіцієнтів впливу факторів за статтю та віком

Практична реалізація. Після завершення наукового ядра «Калькулятора життя» розпочалась робота програмного забезпечення. На етапі аналізу та планування враховували технічні вимоги та обмеження цифрової інфраструктури ЦГЗ МОЗ України, що створило додаткові виклики. Обчислювальні ресурси були обмежені, а технології бекенду обмежувались PHP і MySQL. Зважаючи на очікувані великі навантаження, розрахунки було вирішено здійснювати на стороні браузера за допомогою JavaScript. Це зменшило навантаження на сервери ЦГЗ та ризики кібербезпеки, а сервери використовуються лише для передачі статичного контенту і збору анонімних відповідей респондентів.

Програмне забезпечення відповідає стандарту ISO 42010, що забезпечує чітку архітектуру і взаємодію компонентів [11]. Модель архітектури реалізована з використанням мови ArchiMate (рис. 3).

На бізнес-рівні основним суб'єктом є респондент, який взаємодіє з сервісом «Анкетування». Процес заповнення анкети передбачає введення особистих даних і звичок для розрахунку персоналізованих ймовірностей виживання та очікуваної тривалості життя.

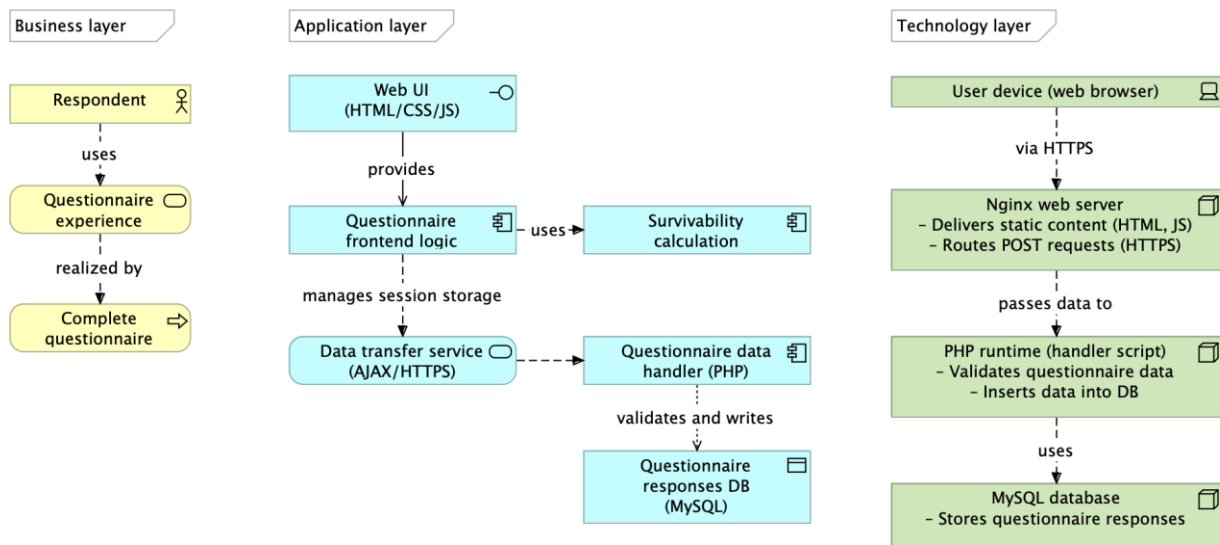


РИС. 3. ArchiMate модель архітектури «Калькулятор життя»

На технологічному рівні використовується HTTPS для безпечної передачі даних. Браузер респондента підключається до сервера Nginx, який обслуговує статичні файли і передає дані PHP-скриптам для подальшої обробки та зберігання в MySQL. Це забезпечує чіткий розподіл обов'язків між клієнтською та серверною частинами.

Очікується, що респондент може пройти опитування за 3 хвилини. Важливо було мінімізувати тривалість анкети, адже короткі анкети забезпечують кращий рівень завершення і більший відгук респондентів [12]. Веб-інтерфейс адаптований для різних пристроїв і браузерів та має українську і англійську версії.

Веб-інтерфейс опитувальника складається з 6 розділів.

1. Вітальна сторінка з інформацією про середню тривалість проходження та коротким описом анкети, яка запрошує розпочати опитування.

2. Інформаційний розділ, що містить політику конфіденційності і збирає базові дані: вік і стать. Наступний слайд включає мотиваційне питання щодо досягнення обраної або самостійно сформульованої мрії у визначений рік. Ця інформація не використовується у розрахунках, не зберігається і служить лише мотивацією для повного проходження анкети.

3. Розділ звичок: збирає інформацію щодо куріння, вживання алкоголю, харчування та фізичної активності.

4. Розділ медичних даних, що включає зріст, вагу, перелік захворювань та медичних станів, інформацію про частоту звернень до сімейного лікаря, викликів швидкої допомоги та госпіталізацій на рік.

5. Сторінка додаткової інформації про місце проживання, розмір населеного пункту, освіту, місячний дохід та статус внутрішньо переміщеної особи. Регіон і розмір населеного пункту наразі є статистичними і не впливають на персональні результати.

6. Сторінка результатів: містить інформацію про очікувану тривалість життя, ймовірність досягнення визначеного віку у певному році та інтерактивний слайдер, який демонструє ймовірність виживання від поточного віку до 110 років (рис. 4). Це дозволяє користувачам краще зрозуміти свій

прогноз, усвідомити вплив шкідливих звичок і звернути більшу увагу на своє здоров'я. На цій сторінці також є кнопка для поширення результатів у соцмережах, що мотивує інших користувачів пройти опитування, створюючи відчуття спільності та розширюючи аудиторію [13].

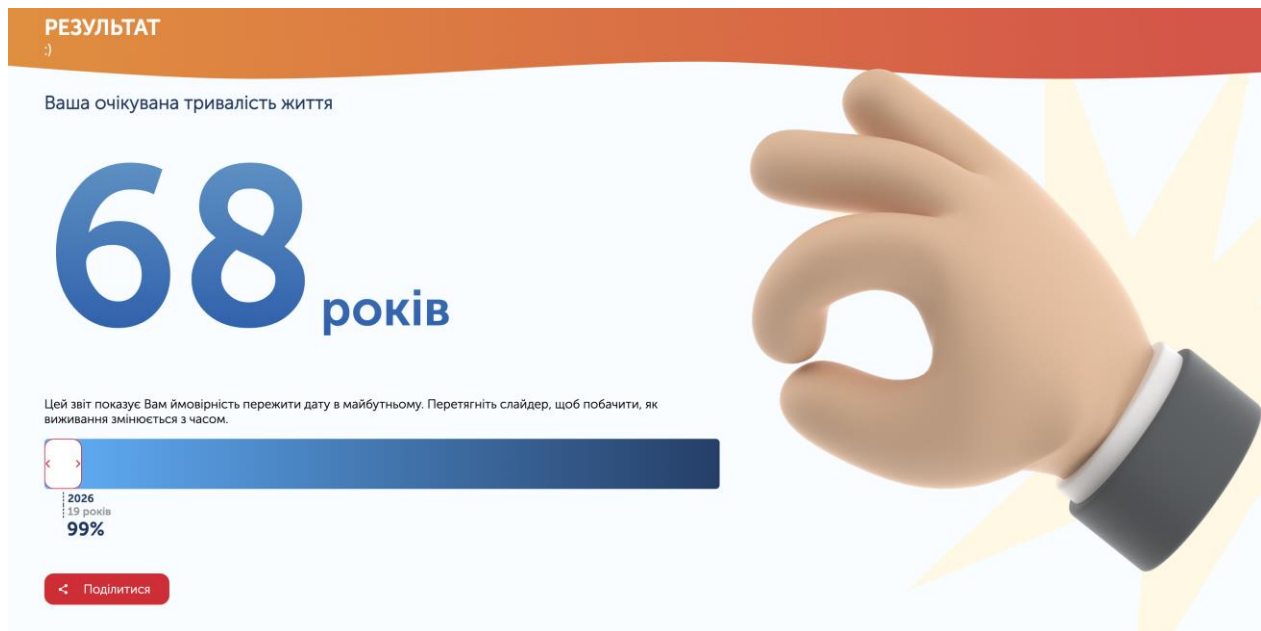


РИС. 4. Веб-інтерфейс сторінки результатів «Калькулятор життя» з прикладом проходження

Результати. Розроблена інтегрована технологія унікально адаптована для українського населення, включаючи фактори, які не були детально досліджені раніше. Зокрема, до моделі були інтегровані різні ступені тяжкості COVID-19, хоча ці фактори, попри глобальну значимість, рідко враховуються в інших технологіях. Цей підхід підвищує точність розрахунків тривалості життя і відображає специфічний соціально-демографічний та епідеміологічний контекст України.

Для ілюстрації роботи розробленого інструменту прогнозування тривалості життя наведемо конкретний приклад проходження користувачем онлайн-опитувальника. Респондентом був чоловік віком 35 років, який ніколи не курав, має ступінь PhD, середні доходи, статус внутрішньо переміщеної особи, мріє завершити справу свого життя до 2060 року. Маса тіла становила 80 кг при зрості 180 см. Раціон характеризується щоденним вживанням фруктів, овочів та соків (5 порцій кожного). COVID-19 у важкій або середній формі користувач не переносив, госпіталізацій та викликів швидкої допомоги не було, алкоголь не вживає (лише одноразовий досвід), консультацію лікаря мав лише один раз на рік. Легка фізична активність становить приблизно 20 хвилин щоденно, помірна та інтенсивна фізична активність відсутні. Отриманий у результаті прогнозування показник очікуваної тривалості життя цього користувача становив 75 років (рис. 5), а шанси дожиття до 2060 року становлять 74 % (рис. 4).

Отримані результати свідчать про достатньо високий вплив позитивних поведінкових факторів (відсутність шкідливих звичок, здорове харчування та інші) та соціально-демографічних факторів (наприклад, високий освітній рівень), проте наявність незначної кількості негативних факторів (наприклад, відносно низький рівень фізичної активності) дещо обмежує потенційно можливу тривалість життя.

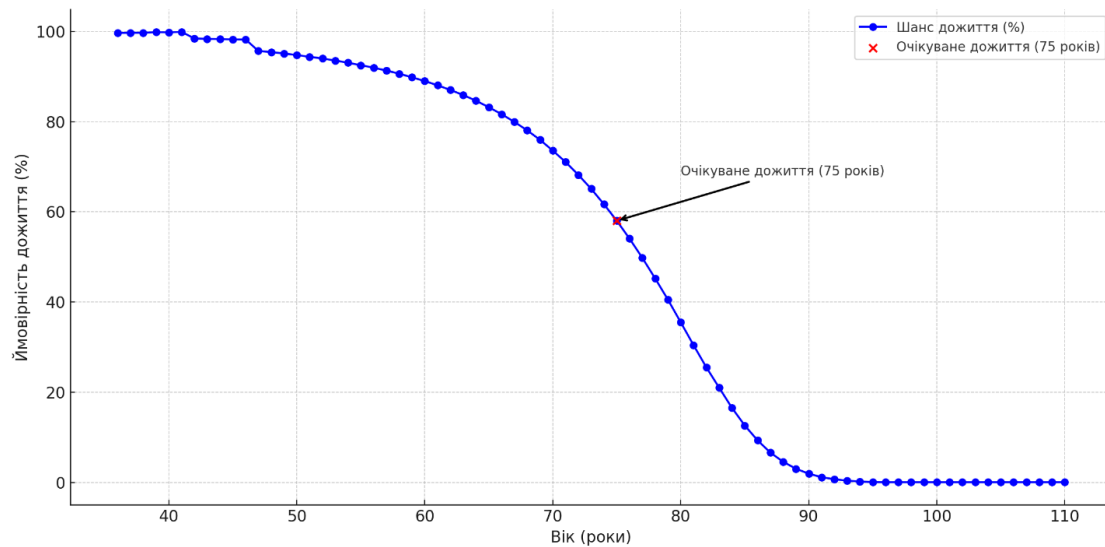


РИС. 5. Персональна таблиця дожиття для прикладу проходження

Таким чином, розроблена модель прогнозування дозволяє наочно демонструвати індивідуальний внесок різних факторів у формування очікуваної тривалості життя та допомагає сформулювати рекомендації щодо поліпшення способу життя користувачів.

Програмне забезпечення «Калькулятор життя» створено з урахуванням високих вимог до доступності та стабільності навіть при обмежених ресурсах. Використання обчислень на стороні користувача значно зменшує навантаження на сервери та забезпечує безперебійну роботу в пікові періоди. Реалізація надійних заходів безпеки гарантує захист передачі та зберігання даних.

Протягом першого півріччя після запуску було завершено 200,454 анкет із 260,379 розпочатих сесій на веб-порталі Центру громадського здоров'я [14]. Завершеними вважаються анкети, в яких респонденти дійшли до сторінки результатів у проміжку між 30 та 1200 секунд з початку опитування. В середньому на завершення анкети у респондентів витрачалося 4 хвилини 15 секунд, більш детальні дані по часу вказані в табл. 3.

ТАБЛИЦЯ 3. Статистичні характеристики часу завершення проходження опитувальника

Характеристика	Час, секунд
Середнє значення (mean)	255
Медіана (p50)	229
Стандартне відхилення (std)	140
Мінімальне значення	30
Максимальне значення	1200
90-й перцентиль (p90)	407
95-й перцентиль (p95)	499
99-й перцентиль (p99)	808

Серед відвідувачів переважали чоловіки (63,6 %). Як і очікувалось, продукт здебільшого зацікавив молодь (70,6 % у віці 20–30 років), однак суттєвою була також частка респондентів віком від 30 до 60 років – 25,6 %.

На цій же виборці для додаткової валідації та порівняння результатів запропонованої моделі, зібрані через веб-застосунок анкетні дані (у тих питаннях, які мають прямі аналоги) були конвертовані та завантажені у відкриту міжнародну модель прогнозування тривалості життя MPoRT версії 1.19.4 (табл. 4). Отримані результати дозволили здійснити порівняльний аналіз основних статистичних показників прогнозованої тривалості життя.

ТАБЛИЦЯ 4. Статистичні характеристики результатів очікуваної тривалості життя респондентів

Параметр	Вік, роки			
	«Калькулятор життя»		MPoRT	
	Чоловіки	Жінки	Чоловіки	Жінки
Середнє значення (mean)	73	83	82	77,4
Медіана (p50)	74	83	81,6	73,5
Стандартне відхилення (std)	4,5	3,5	15,7	16
Мінімальне значення	42	55	28,3	28,4
Максимальне значення	98	101	124,9	124,3
90-й перцентиль (p90)	78	86	109,1	109,8
95-й перцентиль (p95)	78	87	111,1	111
99-й перцентиль (p99)	79	87	113	113,8

Для оцінки ефективності запропонованої моделі було проведено порівняльний аналіз основних регресійних метрик запропонованої моделі з міжнародною моделлю прогнозування тривалості життя MPoRT (табл. 5). У цьому випадку використання ROC-кривих є недоцільним, оскільки прогнозована величина є неперервною (очікувана тривалість життя), а не бінарною класифікацією. Тому оцінювання проводилось лише за регресійними метриками, які дозволяють адекватно оцінити точність прогнозування. Порівняння здійснювалось із таблицею очікуваної тривалості життя Державної служби статистики України за 2020 рік.

ТАБЛИЦЯ 5. Порівняння регресійних метрик запропонованої моделі з моделлю MPoRT

Модель	RMSE (↓)	MAE (↓)	R ² (↑)	MAPE (↓)	MSE (↓)	C-index (↑)
Калькулятор Життя	5.794	4.862	-1.428	6.491	33.565	0.706
MPoRT	16.426	13.028	-18.515	17.242	269.828	0.456

Модель «Калькулятор життя» демонструє суттєво кращі показники точності та надійності порівняно з моделлю MPoRT. Зокрема, середньоквадратична похибка (RMSE) моделі «Калькулятор життя» становить 5,794, що майже втричі менше, ніж у MPoRT (16,426). Середня абсолютна похибка (MAE) також суттєво нижча (4,862 проти 13,028 відповідно), що свідчить про більш точні та стабільні прогнози. Коефіцієнт детермінації (R²) моделі MPoRT виявився негативним (-18,515), що свідчить про низьку якість відповідності прогнозних даних реальним значенням для українського населення, натомість запропонована модель має значно кращий показник R² (-1,428). Значення MAPE (Mean Absolute Percentage Error) також значно нижче у запропонованій моделі (6,491 %) порівняно з MPoRT (17,242 %). Показник Concordance Index (C-index), який демонструє здатність моделі коректно ранжувати ризики та точність прогнозування подій, у моделі «Калькулятор життя» становить 0,706, що свідчить про високу прогностичну точність моделі. У моделі MPoRT цей показник суттєво нижчий (0,456).

Таким чином, отримані результати підтверджують переваги запропонованої моделі для персоналізованого оцінювання очікуваної тривалості життя в Україні, особливо в умовах специфічних соціально-демографічних та медичних викликів, що мають місце в українському суспільстві.

Висновки. У рамках цього дослідження були повністю виконані поставлені завдання.

Проаналізовано сучасні методи та підходи до прогнозування тривалості життя, зокрема, міжнародні моделі MPoRT та Lee-Carter, і визначено їхні обмеження для застосування в умовах України. На основі проведеного аналізу визначено та формалізовано основні демографічні, соціальні та медичні фактори, необхідні для побудови інтегрованої моделі прогнозування, специфічної саме для українського населення.

Визначено та формалізовано основні фактори для прогнозування, зокрема інтегровано демографічні, соціальні, поведінкові та медичні фактори. Вперше для українського контексту враховано статус внутрішньо переміщеної особи, посттравматичний стресовий розлад та наслідки COVID-19.

Розроблено нову математичну модель персоналізованого прогнозування, яка інтегрує різноманітні дані та сучасні алгоритми машинного навчання. Модель враховує як діагностичні, так і недіагностичні фактори, що дозволяє здійснювати адаптивне прогнозування з урахуванням актуальних умов та кризових явищ в Україні, таких як статус внутрішньо переміщеної особи, посттравматичний стресовий розлад та наслідки COVID-19.

Розроблено математичну модель персоналізованого прогнозування, що включає інтегровану методику із застосуванням адаптивних коефіцієнтів впливу, яка враховує специфіку українського суспільства та диференціює діагностичні й недіагностичні фактори.

Розроблену модель реалізовано у вигляді практичного веб-застосунку «Калькулятор життя», який пройшов експериментальну апробацію на реальних даних українського населення. Під час апробації інструментом скористалися понад 200 тисяч респондентів, що свідчить про його високу зручність, ефективність та популярність серед населення. Статистичні показники підтвердили адекватну точність розробленої технології та її здатність до ефективного застосування для індивідуального та громадського планування здоров'я. Окремо слід відзначити, що «Калькулятор життя» може відігравати соціально-психологічну підтримувальну роль. Спеціалізовані опитувальники для окремих груп, таких як військовослужбовці Збройних сил України [15], можуть додатково підвищити прогностичні можливості інструменту.

Оцінено ефективність, точність та зручність запропонованої технології, у результаті чого встановлено, що модель надає максимально наближені результати до фактичних демографічних характеристик українського суспільства. Водночас визначено перспективні напрями розвитку цієї технології, серед яких інтеграція зі сторонніми інформаційними системами та медичними сервісами, застосування біометричних даних та штучного інтелекту для подальшого підвищення точності прогнозування і зручності використання.

Таким чином, усі завдання дослідження були успішно виконані, а запропонована модель та програмне забезпечення підтвердили свою актуальність та перспективність для вирішення завдань персоналізованого оцінювання очікуваної тривалості життя в Україні.

Авторські внески: Маланін В.Ю. – дослідження, концептуалізація, методологія, формальний аналіз, розробка програмного забезпечення, написання – оригінальна чернетка. Чайковський І.А. – дослідження, концептуалізація, методологія – рецензування та редагування.

Наявність даних. Дані, які підтверджують висновки цього дослідження, доступні на веб-сайті «Калькулятор життя» розташованому на інфраструктурі ЦГЗ МОЗ України <https://life-calc.phc.org.ua>, а також на репозиторії <https://github.com/vladmalanin/lifecalculator/>.

Подяки. Автори висловлюють подяку ЦГЗ МОЗ України за ідею, підтримку та супровід «Калькулятора життя».

Фінансування. Розробка та певні дослідження «Калькулятора життя» фінансувались ЦГЗ МОЗ України протягом 2020–2021 рр.

Список літератури

1. Kurylo I. Tendencies of mortality and life expectancy in Ukraine before the Russian full-scale military invasion. *Economy and Sociology*. 2022. 1. P. 58–71. <https://doi.org/10.36004/nier.es.2022.1-06>
2. Walsh J., Middleton J. Inconsistencies in methodologies of calculating expectation of life. *Spinal Cord*. 2013. 51 (12). P. 938–939. <https://doi.org/10.1038/sc.2013.95>
3. Li Y., Schoufour J., Wang D., Dhana K., Pan A., Liu X., et al. Healthy lifestyle and life expectancy free of cancer, cardiovascular disease, and type 2 diabetes: prospective cohort study. *BMJ*. 2020. 16669. <https://doi.org/10.1136/bmj.l6669>
4. Manuel D., Dujovny M., Perez R., Sanmartin C., Taljaard M., Hennessy D., Wilson K., et al. Measuring burden of unhealthy behaviours using a multivariable predictive approach: life expectancy lost in Canada attributable to smoking, alcohol, physical inactivity, and diet. *PLOS Medicine*. 2016. 13 (8). e1002082. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002082>
5. Project Big Life. <https://www.projectbiglife.ca/> (звернення: 01.05.2025)
6. Lee R.D., Carter L.R. Modeling and Forecasting U.S. Mortality. *Journal of the American Statistical Association*. 1992. 87 (419). P. 659–671. <https://doi.org/10.1080/01621459.1992.10475265>
7. Mathers C., Iburg K., Salomon J., Tandon A., Chatterji S., Ustun B., et al. Global patterns of healthy life expectancy in the year 2002. *BMC Public Health*. 2004. 4 (1). <https://doi.org/10.1186/1471-2458-4-66>
8. Wojtyniak B., Stokwizewski J. Contribution of avoidable causes of death to premature mortality in Poland and selected European countries. *Studia Demograficzne*. 2020. 2 (178). <https://doi.org/10.33119/sd.2020.2.4>
9. Zasiakina L., Zasiakin S., Kuperman V. Post-traumatic stress disorder and moral injury among Ukrainian civilians during the ongoing war. *Journal of Community Health*. 2023. 48 (5). P. 784–792. <https://doi.org/10.1007/s10900-023-01225-5>
10. Okorodudu D., Jumeau M., Montori V., Romero-Corral A., Somers V., Erwin P., et al. Diagnostic performance of body mass index to identify obesity as defined by body adiposity: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Obesity*. 2010. 34 (5). P. 791–799. <https://doi.org/10.1038/ijo.2010.5>
11. ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Software, systems and enterprise – Architecture description. International Organization for Standardization. 2022. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9932105> (звернення: 01.05.2025)
12. Khamisa N., Peltzer K., Ilić D., Oldenburg B. Evaluating research recruitment strategies to improve response rates amongst South African nurses. *SA Journal of Industrial Psychology*. 2014. 40 (1). <https://doi.org/10.4102/sajip.v40i1.1172>
13. Kotsopoulos S., Casalegno F., Recasens A., Graybill W. Developing a RESTful communication protocol and an energy optimization algorithm for a connected sustainable home. *Proceedings of the First International Conference on IoT in Urban Space*. 2014. <https://doi.org/10.4108/icst.urb-iot.2014.257303>
14. Life Calculator. <https://life-calc.phc.org.ua> (звернення: 01.05.2025)
15. Bocharov M., Stasiuk V., Osyodlo V., Ryzhenko T., Malanin V., Chumachenko D., Chaikovsky I. Assessment of the physiological cost of activities for Ukrainian defense forces officers using a miniature ECG device. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2023. 10. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1239128>

Одержано 09.05.2025

Маланін Владислав Юрійович,

аспірант Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0009-0008-9095-3644>
vladislav.malanin@gmail.com

Чайковський Ілля Анатолійович,

доктор медицини (Німеччина), кандидат медичних наук, провідний науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.
<https://orcid.org/0000-0002-4152-0331>
illya.chaikovsky@gmail.com

УДК 519.861.3

В.Ю. Маланін *, І.А. Чайковський

Розробка математичної моделі для персоналізованого оцінювання очікуваної тривалості життя в Україні

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ*** Листування: vladislav.malanin@gmail.com*

Вступ. Проблема персоналізованого прогнозування тривалості життя – актуальна задача сучасної медичної кібернетики та має вагоме значення для охорони здоров'я й соціального планування. Особливо важливе значення вона набуває в умовах кризових ситуацій, зокрема, війни, пандемії COVID-19, економічних труднощів та демографічних змін, які останніми роками поглиблюються в Україні. Існуючі моделі прогнозування тривалості життя, такі як Mortality Population Risk Tool (MPoRT) і модель Lee-Carter, мають суттєві обмеження щодо врахування локальних особливостей українського населення. У зв'язку з цим, постає необхідність розробки адаптивних та інтегрованих моделей, що враховують специфічні демографічні, медичні та соціально-поведінкові фактори, характерні саме для України. У представленій роботі описано математичну модель та практичний веб-опитувальник «Калькулятор життя», розроблений за підтримки Центру громадського здоров'я МОЗ України. Модель ґрунтується на персоналізованому підході до оцінювання ймовірності виживання людини з урахуванням широкого спектру індивідуальних факторів.

Мета роботи. Розробка інтегрованої методики персоналізованого прогнозування тривалості життя з урахуванням унікальних індивідуальних факторів українського населення та створення відповідного програмного інструменту для практичного застосування.

Результати. Запропоновано унікальну інтегровану методику прогнозування очікуваної тривалості життя, яка включає 26 різноманітних факторів впливу, що поділяються на діагностичні (пов'язані із захворюваннями) та недіагностичні (поведінкові, соціально-економічні).

Вперше для умов України було інтегровано фактори, що особливо актуальні в поточних умовах: статус внутрішньо переміщеної особи, посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) та наслідки перенесеного COVID-19. Проведено масштабну апробацію веб-інструменту «Калькулятор життя», результати якого підтвердили високий інтерес населення до такого роду персоналізованих прогнозів. За перші шість місяців роботи було успішно завершено понад 200 тисяч анкет, що свідчить про зручність та зрозумілість інструменту. Статистичний аналіз отриманих даних продемонстрував, що середня очікувана тривалість життя склала 73 роки для чоловіків та 83 роки для жінок. Опитувальник дозволяє користувачам у реальному часі отримати персоналізовану таблицю виживання, яка візуально демонструє ймовірність виживання до віку 110 років. Такий підхід сприяє усвідомленню впливу різних факторів на тривалість життя та мотивує до здоровішого способу життя.

Проведений аналіз також показав, що розроблена модель має високий потенціал для інтеграції з існуючими інформаційними системами та сервісами, такими як Helsi та Дія, а також можливість використання біометричних даних та даних з носимих пристроїв для більш точних та детальних прогнозів.

Висновки. Запропонована математична модель та розроблений на її основі веб-опитувальник «Калькулятор життя» ефективно вирішують задачу персоналізованого прогнозування тривалості життя українського населення. Їх широке застосування підтверджує високий рівень актуальності та попиту на подібні рішення. Модель відрізняється адаптивністю до змінюваних умов і може слугувати важливим інструментом не лише для персонального моніторингу стану здоров'я, але й для формування ефективних стратегій охорони громадського здоров'я та соціального планування в Україні. Подальше вдосконалення та інтеграція моделі з іншими медичними інформаційними ресурсами сприятиме підвищенню швидкості заповнювання даних, точності прогнозів та розширенню сфери її практичного застосування.

Ключові слова: математична модель, тривалість життя, медична кібернетика, програмне забезпечення, інформаційні технології, Україна.

UDC 519.861.3

Vladyslav Malanin *, Illya Chaykovsky

Development of a Mathematical Model for Personalized Estimation of Life Expectancy in Ukraine

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

*Correspondence: vladislav.malanin@gmail.com

Introduction. The issue of personalized life expectancy prediction is a relevant task in contemporary medical cybernetics, significantly impacting public health and social planning. It gains special importance during crisis situations such as war, the COVID-19 pandemic, economic hardships, and demographic changes that have intensified in Ukraine in recent years. Existing models for life expectancy prediction, such as the Mortality Population Risk Tool (MPoRT) and the Lee-Carter model, have significant limitations regarding the inclusion of local characteristics specific to the Ukrainian population. Thus, there is a necessity to develop adaptive and integrated models that account for specific demographic, medical, and socio-behavioral factors particular to Ukraine. This paper presents a mathematical model and the practical tool "Life Calculator," developed with the support of the Public Health Center of Ukraine's Ministry of Health. The model is based on a personalized approach to estimating an individual's survival probability, taking into account a broad spectrum of individual factors.

The purpose of the paper is to develop an integrated methodology for personalized prediction of life expectancy considering unique individual factors of the Ukrainian population, and to create a practical software tool for its implementation.

Results. A unique integrated methodology for predicting life expectancy has been proposed, incorporating 26 diverse impact factors classified into diagnostic (related to medical conditions) and non-diagnostic (behavioral, socio-economic).

For the first time, factors highly relevant to current conditions in Ukraine, such as internally displaced person status, PTSD, and COVID-19 effects, have been integrated. A large-scale trial of the "Life Calculator" web tool confirmed substantial public interest in personalized predictions of this nature. Over the first six months of operation, more than 200,000 questionnaires were successfully completed, indicating the tool's ease of use and clarity. Statistical analysis revealed that the average expected life expectancy was 73 years for men and 83 years for women. The tool enables real-time generation of personalized survival tables, visually demonstrating survival probabilities up to the age of 110. This approach raises awareness of various factors' influence on life expectancy and motivates healthier lifestyle choices.

Analysis also revealed the developed model's significant potential for integration with existing information systems and services such as Helsi and Diia, as well as the possibility of utilizing biometric data and data from wearable devices for faster data provision, more precise and detailed predictions.

Conclusions. The proposed mathematical model and the web-based "Life Calculator" tool effectively address personalized life expectancy prediction for the Ukrainian population. Their widespread use confirms the high relevance and demand for such solutions. The model is adaptable to changing conditions and can serve as an important tool not only for personal health monitoring but also for developing effective public health and social planning strategies in Ukraine. Further improvement and integration of the model with other medical information resources will enhance prediction accuracy and broaden the practical application scope.

Keywords: mathematical model, life expectancy, personalized prediction, medical cybernetics, Ukraine.