

Прогнозування відновлення психофізіологічного стану після хронічного стресу: нейромережна модель

В.І. Цимбалюк¹, С.Н. Вадзюк², П.С. Табас², О.М. Ратинська², В.В. Сас²,
М.О. Сопіга³

¹ Інститут нейрохірургії НАМН України, Київ;

² Тернопільський національний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського;

³ Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ;
e-mail: vadzyuk@tdmu.edu.ua

Психофізіологічний стан учасників бойових дій визначається стресостійкістю, вольовою саморегуляцією, рівнем особистісної тривожності та індивідуальними особливостями вищої нервової діяльності. Науковцями поки що приділено недостатньо уваги прогнозуванню відновлення психоемоційного стану, хоча це має надзвичайно важливе значення у сучасних умовах. Мета нашого дослідження – вивчити особливості психофізіологічного стану у осіб із різною стресостійкістю, що перенесли хронічний стрес та розробити нейромережні моделі для прогнозування ефективності та тривалості їх реабілітації. Проведено обстеження 637 осіб, які повернулися із зони бойових дій у перший тиждень, через місяць та через 3 міс. Визначали стресостійкість, рівень депресії, вольову саморегуляцію, особистісну та ситуативну тривожність, а також оцінювали індивідуальні особливості вищої нервової діяльності. Було встановлено, що найбільш значущими психофізіологічними параметрами для прогнозу ефективного реабілітаційного періоду є стресостійкість, особистісна та ситуативна тривожність, емоційна стійкість. Ці показники мали виражений вплив на прогнозування з високою точністю (92%) та чутливістю (90%). Висока чутливість та специфічність побудованої нейронної моделі дає змогу забезпечити індивідуальний підхід щодо тривалості реабілітаційного періоду у осіб, які перенесли хронічний стрес.

Ключові слова: стресостійкість; хронічний стрес; психофізіологічний стан; нейронні мережі; прогнозування; реабілітація.

ВСТУП

Емоційно-вольова стійкість – ключовий фактор, який впливає на швидкість та адекватність дій в екстремальних ситуаціях [1–3]. Важливим показником психофізіологічного стану є депресія, яка взаємопов’язана з стресостійкістю, вольовою саморегуляцією, тривожністю та індивідуальними особливостями вищої нервової діяльності [4–6]. Показано, що вербальна та зорова коротко- та довготривала пам’ять, психомоторні навички та увага порушуються при депресії [7]. Тому цей психоемоційний стан може послабити стресостійкість, порушити нормальну життє-

діяльність та вплинути на боєздатність воїнів.

Належна стресостійкість оберігає людину від особистісної дезінтеграції, визначає його життєздатність, передбачає низький рівень тривожності, самоконтроль емоційно-вольової сфери, розвинену мотиваційну сферу [8]. Наявність значної кількості інформації про емоційну стійкість та стресостійкість у сучасних умовах не дає відповіді на цілу низку питань, пов’язаних із прогнозуванням відновлення психофізіологічного стану, зокрема зниження депресії, а відповідно, і зростання професійної успішності у разі підвищених стресових чинників, визначенням тривалості шляхів реабілітації.

Мета нашого дослідження – вивчити особливості психофізіологічного стану у осіб із різною стресостійкістю, що перенесли хронічний стрес та розробити нейромережні моделі для прогнозування ефективності і тривалості їх реабілітації.

МЕТОДИКА

Обстежено 637 військовослужбовців віком від 19 до 59 років, що перебували на ротатії із елементами психологічної реабілітації, у перший тиждень після повернення з місць бойових дій, через місяць та через 3 міс. Робота виконана на базі атестованої МОЗ України (Головна організація метрологічної служби МОЗ України, № 182 від 2023 р.) лабораторії психофізіологічних досліджень кафедри фізіології з основами біоетики та біобезпеки Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського відповідно до законів України та принципів Гельсінської Декларації з прав людини. Програму обстеження, інформацію для обстежуваних осіб та форму інформованої згоди погоджено комісією з питань етики установи (протокол № 79 від 07.11.2023 р.).

Стресостійкість визначали із використанням тестової методики «Коротка шкала стресостійкості» [9]. Депресію виявляли з використанням опитувальників пацієнта про стан здоров'я (Patient Health Questionnaire – PHQ-9) [10], Госпітальної шкали тривоги і депресії (HADS) [11]. Для оцінки ефективності прогнозів нейронних моделей проведено контрольне визначення депресії за опитувальником PHQ-9 через 3 міс після повернення з місць бойових дій. Для визначення рівня розвитку вольової саморегуляції використовували тест-опитувальник [12]. Індивідуальні особливості вищої нервової діяльності військовослужбовців оцінювали за допомогою комп'ютерної програми «Діагност-1М» на основі показників: періоду простої (ПЗМР) та складної (СЗМР) зорово-моторної реакції та функціональної

рухливості нервових процесів (ФРНП) [13]. Ситуативну та особистісну тривожність визначали за опитувальником Спілбергера–Ханіна [14].

Нейронні моделі побудовано за допомогою архітектури багатoshарового персептрону із застосуванням методу Deep Learning [15]. Розроблено моделі для прогнозування показників через 1 міс та через 3 міс після початку реабілітації. Для оцінки кожної моделі було побудовано криві похибок (ROC-криві) із подальшим обчисленням площі під кривою та обраховували такі показники ефективності як: точність, чутливість, специфічність, влучність, коефіцієнт Метью.

Для здійснення прогнозу психофізіологічного стану окремого обстежуваного через 1 міс реабілітації до нейронної мережі вносили результати станом на початок реабілітаційного періоду (рівень психостійкості, депресії за шкалами PHQ-9, HADSt та HADSd, емоційної нестабільності/вольової регуляції, ситуативної та особистісної тривожності, ПЗМР, СЗМР, ФРНП). Для прогнозу через 3 міс вносили результати станом на початок реабілітаційного періоду та через 1 міс реабілітації. Оцінювали відповідь мережі: 0 – прогнозується задовільний психофізіологічний стан (відсутні ознаки депресії), 1 – прогнозується незадовільний психофізіологічний стан (клінічно виражена депресія).

Інтерпретацію параметрів кожної нейронної мережі здійснювали за допомогою методу LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) [16]. Визначали показники значущості кожного фактора для кінцевого прогнозу нейронної моделі.

Отримані результати статистично обробляли загальноприйнятими методами біомедичної статистики з використанням відкритого програмного забезпечення «RStudio» та платформи «R language» [17], а програмного забезпечення «Microsoft Excel». Для побудови лінійних моделей та нейронних мереж використовували пакети «Tensorflow 2,0» та «LIME» [18].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Оцінка вихідних значень. Встановлено добру стресостійкість у 61% і середню – у 39% військовослужбовців. Показник депресії за шкалою PHQ-9 в осіб із різною стресостійкістю одразу після повернення з фронту підвищувався з погіршенням стресостійкості. Результати дослідження рівня тривоги за методикою HADS свідчать про її зростання зі зниженням стресостійкості (табл. 1).

Одразу після повернення військовослужбовців з фронту у 92% випадків добра

стресостійкість поєднувалася з високим рівнем вольової саморегуляції, і лише у 8% – з низьким; середня стресостійкість у 83% збігалася з низькою вольовою саморегуляцією та лише у 18% – з високою. При контрольному обстеженні через 3 міс згідно з опитувальником PHQ-9 386 особи мали нормальний рівень у групі з доброю стресостійкістю, а у групі з середньою стресостійкістю – 190 осіб, 53 – субклінічно виражену депресію та 8 – клінічно виражену депресію.

Одразу після повернення з фронту у обстежуваних із доброю стресостійкістю

Таблиця 1. Рівень депресії та тривоги у осіб із різною стресостійкістю після хронічного стресу

Показники	Стресостійкість			
	добра (n = 386)		середня (n = 251)	
	через тиждень	через 1 міс	через тиждень	через 1 міс
Депресія PHQ-9				
норма	357	384	44*	126**
субклінічно виражена	28	2	150*	99**
клінічно виражена	1	0	57*	26**
Тривога (PHQ-9)				
норма	356	382	54*	115**
субклінічно виражена	28	4	124*	99*
клінічно виражена	2	0	73*	37**
Депресія (HADS)				
норма	357	384	44*	126**
субклінічно виражена	28	2	150*	99**
клінічно виражена	1	0	57*	26**
Тривога (HADS)				
норма	356	382	54*	115**
субклінічно виражена	28	4	124*	99**
клінічно виражена	2	0	73*	37**
Ситуативна тривожність				
низька	329	352	15*	21**
помірна	42	34	59*	104**
висока	16	0	177*	126**
Особистісна тривожність				
низька	369	383	79*	91**
помірна	17	3	57*	209**
висока	0	0	115*	33**

Примітка: * $P < 0,05$ порівняно із доброю стресостійкістю за перший тиждень після повернення з місць бойових дій. ** $P < 0,05$ порівняно із доброю стресостійкістю через місяць після повернення з місць бойових дій.

латентний період ПЗМР, був нижчим від середнього (табл. 2), а СЗМР – середнім. У осіб із середньою стресостійкістю латентний період СЗМР і ФРНП був середнього рівня, а у військових із доброю стресостійкістю ФРНП була вищою від нього.

Таблиця 2. Показники вищої нервової діяльності у військовослужбовців із різною стресостійкістю після хронічного стресу

Показник	Стресостійкість			
	добра (n = 386)		середня (n = 251)	
	через тиждень	через 1 міс	через тиждень	через 1 міс
Період простої зорово-моторної реакції, мс	296,99	286,75	358,38	348,71**
Період складної зорово-моторної реакції, мс	397,53	389,23	453,33*	445,11**
Функціональна рухливість нервових процесів, с	62,70	58,98	77,02	75,25

нейронів у кожному. За її допомогою здійснювали прогнозування наявності (>4 балів за шкалою PHQ-9) або відсутності (<4 за шкалою PHQ-9) депресії на основі рівня психостійкості та вихідних значень за перший тиждень реабілітації.

Вихідних шар мав 2 нейрони. Активаційною функцією прихованих шарів було обрано ReLu (rectified linear unit), вихідного шару – Softmax. Щоб попередити перенавчання мережі було використано регуляцію Dropout з імовірністю 0,5 між прихованими шарами та перед вихідним шаром. Для оптимізації моделі було задіяно функцію оптимізації Adam. Перед навчанням

Прогнозування відновлення психофізіологічного стану через місяць від початку реабілітації. Для прогнозування відновлення психофізіологічного стану через місяць від початку реабілітації побудовано нейронну мережу із 2 прихованими шарами по 10

нейронної мережі здійснювали підготовку показників нормалізацією із використанням методу логарифмічного масштабування (Log-scaling) [15]. Для функції витрати під час навчання мережі обрано бінарну перехресну ентропію [18]:

$$C = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cdot \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y}_i), \quad (1)$$

де: C – функція витрат, N – кількість показників у вибірці, y – реальне значення цільового параметра, $\hat{y}$ – прогнозоване мережею значення цільового параметра.

Для тренування нейронної мережі проведено 25 епох (рис. 1).

Після тренування нейронна мережа де-

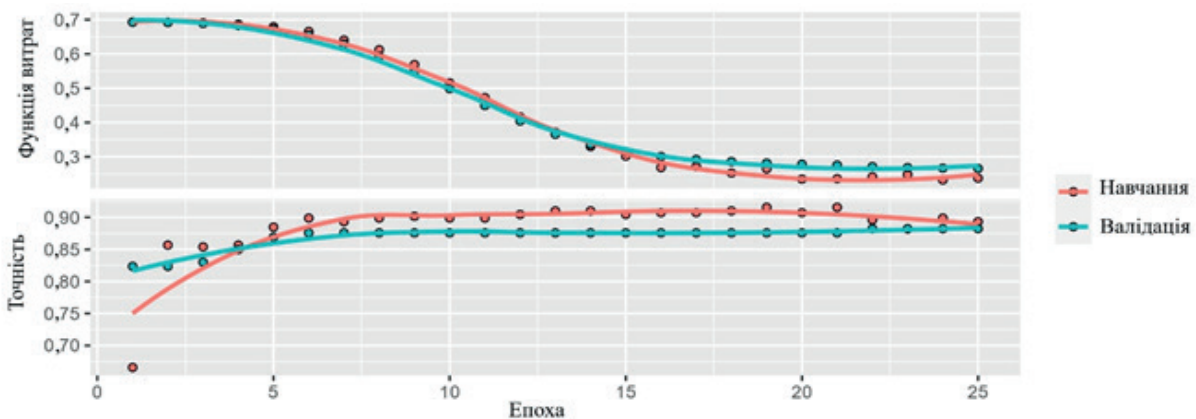


Рис. 1. Навчання нейронної мережі для прогнозування наявності депресії за шкалою PHQ-9 через місяць після початку реабілітації

монструвала високу точність у прогнозуванні рівня депресії за шкалою PHQ-9 через місяць після початку реабілітації на основі стану психостійкості та вихідних значень:

Показник	Значення
Точність	0,8438
Чутливість	0,7246
Специфічність	0,9831
Влучність	0,9804
Коефіцієнт Метью	0,7205

Площа під кривою похибок (ROC-кривою) нейронної мережі становила 0,923. ROC-криву візуалізовано на рис. 2,а.

Під час аналізу впливу вхідних факторів на ймовірність передбачення мережею встановлено, що для прогнозування наявності депресії найбільш значущими факторами є рівень депресії за шкалою PHQ-9, рівень ситуативної тривожності та психостійкості. Зворотне значення на прогноз має рівень емоційної нестабільності на перший тиждень реабілітації:

Прогнозування відновлення психофізіологічного стану через 3 міс після початку реабілітації. Після тренування нейронна мережа демонструвала високі показники у прогнозуванні рівня депресії за шкалою PHQ-9 через 3 міс після початку реабілітації на основі рівня психостійкості та вхідних значень:

Показник	Значення
Точність	0,9219
Чутливість	0,9091
Специфічність	0,9412
Влучність	0,9589
Коефіцієнт Метью	0,8409

Площа під кривою похибок (ROC-кривою) нейронної мережі становила 0,972. ROC-криву візуалізовано на рис. 2,б.

Для прогнозування відновлення у психофізіологічному стані найбільш значущими факторами є рівень депресії за шкалою PHQ-9 за перший тиждень та через місяць реабілітації, рівень особистісної і ситуатив-

Вхідний фактор	Ступінь впливу на прогноз нейронної мережі
Рівень психостійкості на початок реабілітаційного періоду	0,734
Рівень депресії за шкалою PHQ-9 на початок реабілітаційного періоду	0,839
Рівень депресії за шкалою HADSt на початок реабілітаційного періоду	0,654
Рівень депресії за шкалою HADSd на початок реабілітаційного періоду	0,743
Рівень емоційної нестабільності/вольової регуляції на початок реабілітаційного періоду	-0,752
Рівень ситуативної тривожності на початок реабілітаційного періоду	0,785
Рівень особистісної тривожності на початок реабілітаційного періоду	0,732
Період простої зорово-моторної реакції на початок реабілітаційного періоду	0,574
Період складної зорово-моторної реакції на початок реабілітаційного періоду	0,540
Функціональна рухливість нервових процесів на початок реабілітаційного періоду	0,596

ної тривожності, рівень психостійкості. Зворотне значення на прогноз має рівень емоційної нестабільності:

Узагальнення результатів. Розроблена нейронна модель показала високу точність та ефективність у прогнозуванні тривалості

Вхідний фактор	Ступінь впливу на прогноз нейронної мережі
Рівень психостійкості на початок реабілітаційного періоду	0,784
Рівень депресії за шкалою PHQ-9 на початок реабілітаційного періоду	0,877
Рівень депресії за шкалою HADSt на початок реабілітаційного періоду	0,708
Рівень депресії за шкалою HADSd на початок реабілітаційного періоду	0,791
Рівень емоційної нестабільності/вольової регуляції на початок реабілітаційного періоду	-0,778
Рівень ситуативної тривожності на початок реабілітаційного періоду	0,836
Рівень особистісної тривожності на початок реабілітаційного періоду	0,797
Період простої зорово-моторної реакції на початок реабілітаційного періоду	0,595
Період складної зорово-моторної реакції на початок реабілітаційного періоду	0,554
Функціональна рухливість нервових процесів на початок реабілітаційного періоду	0,621
Рівень депресії за шкалою PHQ-9 через місяць реабілітації	0,877
Рівень депресії за шкалою HADSt через місяць реабілітації	0,719
Рівень депресії за шкалою HADSd через місяць реабілітації	0,786
Рівень емоційної нестабільності/вольової регуляції через місяць реабілітації	-0,751
Рівень ситуативної тривожності через місяць реабілітації	0,847
Рівень особистісної тривожності через місяць реабілітації	0,808
Період простої зорово-моторної реакції через місяць реабілітації	0,518
Період складної зорово-моторної реакції через місяць реабілітації	0,454
Функціональна рухливість нервових процесів через місяць реабілітації	0,637

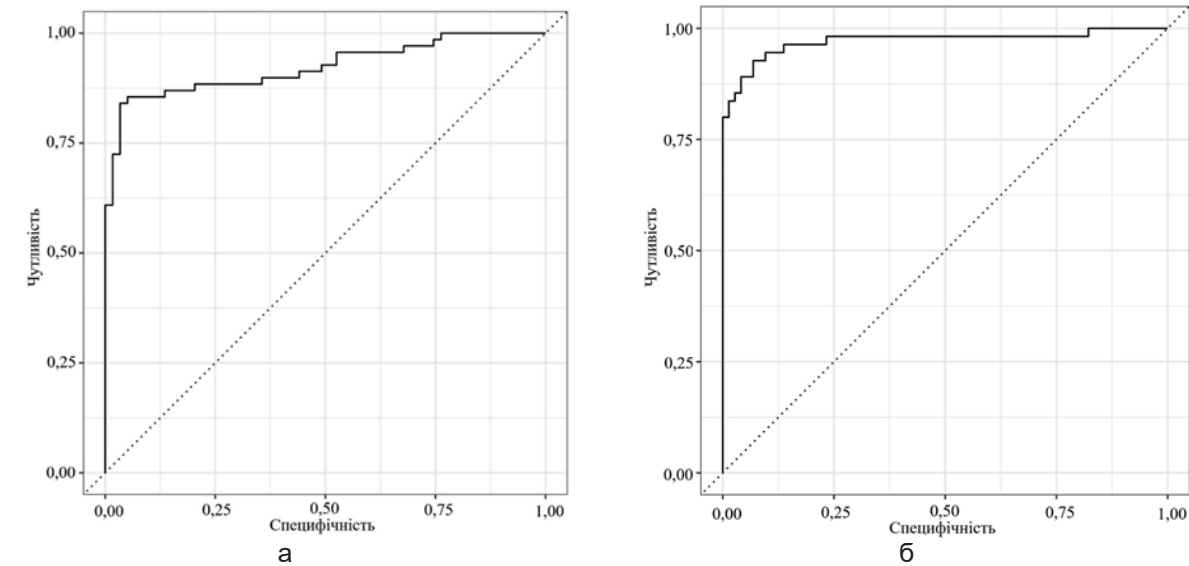


Рис. 2. Крива похибок (ROC-крива) нейронної мережі для прогнозування наявності депресії за шкалою PHQ-9 через місяць (а) і 3 міс (б) після початку реабілітації

реабілітації на основі наявності депресії у різних періодах реабілітаційного процесу. Під час аналізу побудованої нейронної мережі виявлено найбільш значущі психофізіологічні параметри для прогнозу реабілітаційного періоду: рівень психостійкості, рівень особистісної та ситуативної тривожності, показник емоційної нестабільності. Ці фактори є визначальними для здійснення високорезультативних прогнозів психофізіологічного стану військовослужбовців протягом реабілітаційного періоду.

Висока чутливість та специфічність побудованої нейронної моделі дає змогу застосовувати їх для скринінгу та виявлення осіб із нижчою стресостійкістю, які потребують більшої тривалості реабілітаційного періоду. Окрім того, застосування цієї моделі дасть можливість раціонально розділяти ресурси відповідно до прогнозованої тривалості періоду реабілітації. Її також можна використовувати у практиці сімейних лікарів, психологів та психіатрів для попередньої оцінки ймовірної тривалості реабілітації та прийняття відповідних клінічних рішень. Проведений аналіз взаємозв'язків вхідних параметрів та прогнозу нейронних мереж дає змогу узагальнити їхнє фізіологічне значення.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена нейронна мережа продемонструвала високі показники ефективності під час прогнозування перебігу реабілітаційного періоду військовослужбовців із різною стресостійкістю.

2. Встановлено, що найбільш значущими психофізіологічними параметрами для прогнозу тривалості відновлення є стресостійкість, особистісна та ситуативна тривожність, а також емоційна стійкість. Ці фактори мали виражений вплив на прогнозування з високою точністю (92%) та чутливістю (90%).

3. Висока чутливість та специфічність побудованої нейронної моделі дає змогу застосовувати її для скринінгу та поперед-

нього виявлення осіб, яким потрібна більша тривалість реабілітаційного періоду.

The authors of this study confirm that the research and publication of the results were not associated with any conflicts regarding commercial or financial relations, relations with organizations and/or individuals who may have been related to the study, and interrelations of co-authors of the article.

V.I. Tsymbalyuk¹, S.N. Vadzyuk², P.S. Tabas², O.M. Ratynska², V.V. Sas², M.O. Sopiga³

PREDICTING THE RECOVERY OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE AFTER CHRONIC STRESS: A NEURAL NETWORK MODEL

¹ Institute of Neurosurgery of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv;

² Ternopil National Medical University named after I. Ya. Horbachevsky;

³ National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine; Kyiv; e-mail: vadzyuk@tdmu.edu.ua

The psychophysiological state of combatants is determined by stress resistance, volitional self-regulation, the level of personal anxiety and individual characteristics of higher nervous activity. Scientists have so far paid insufficient attention to predicting the recovery of the psycho-emotional state, although it is extremely important in modern conditions. The purpose of the research is to study the features of the psychophysiological state of individuals with different stress resistance who have experienced chronic stress and to develop neural network models for predicting the effectiveness and duration of their rehabilitation. An examination of 637 people who returned from the combat zone in the first week, one month and three months later was conducted. Stress resistance, level of depression, volitional self-regulation, personal and situational anxiety were determined, and individual characteristics of higher nervous activity were assessed. During the study, it was established that the most significant psychophysiological parameters for predicting an effective rehabilitation period are stress resistance, personal and situational anxiety, and emotional stability. These parameters had a pronounced impact on forecasting with high accuracy (92%), sensitivity (90%). The high sensitivity and specificity of the constructed neural model allows for an individual approach to the duration of the rehabilitation period for persons who have experienced acute stress.

Key words: stress resistance; chronic stress; psychophysiological state; neural networks; forecasting; rehabilitation.

REFERENCES

1. Turinina OL. Psychology of traumatic situations: training manual for students in higher education. Kyiv: Person; 2017. [Ukrainian].
2. Tkachuk IM. Prevalence of anxiety and depressive disorders in servicemen participating in anti-terrorist operations. Herald Sci Res. 2018; 1:64-6.
3. Berezovska L, Bohachuk V. Emotional stability of military officers: an empirical perspective. Bull Natl Defense Univ. 2022; 9:19-25.
4. Bartone PT, Homish GG. Influence of hardiness, avoidance coping, and combat exposure on depression in returning war veterans: A moderated-mediation study. J Affect Disord. 2020; 265:511-8.
5. Karstoft KI, Nielsen ABS, Nielsen T. Assessment of depression in veterans across missions: a validity study using Rasch measurement models. EJPT. 2017; 8(1):65-8.
6. Moradi Y, Dowran B, Sepandi M. The global prevalence of depression, suicide ideation, and attempts in the military forces: a systematic review and meta-analysis of cross sectional studies. BMC Psychiatr. 2021; 21(1):510.
7. Vadzyuk SN, Sas VV. The state of depression and anxiety in military personnel with different stress resistance. Arch Clin Exp Med. 2023; 3:46-55.
8. Vogelzangs N, De Jonge P, Smit JH, Bahn S, Penninx BW. Cytokine production capacity in depression and anxiety. Transl Psychiatr. 2016; 6(5):825-e825.
9. Smith BW, Dalen J, Wiggins K, Tooley E, Christopher P, Bernard J. The brief resilience scale: Assessing the ability to bounce back. Int J Behav Med. 2008;194-200.
10. Kocalevent RD, Hinze A, Brähler E. Standardization of the depression screener patient health questionnaire (PHQ-9) in the general population. Gen Hosp Psychiatr. 2013; 35(5):551-5.
11. Ustinov OV. Algorithm of a doctor's actions when providing medical care to patients with depression. UMJ. 2015; 2:1-12.
12. Alonso-Tapia J, Calderón EP, Ruiz MA. Development and validity of the emotion and motivation self-regulation questionnaire (EMSR-Q). Span J Psychol. 2014; 17:55.
13. Rab SL, Admon R. Parsing inter-and intra-individual variability in key nervous system mechanisms of stress responsivity and across functional domains. Neurosci Biobehav Rev. 2021; 120:550-64.
14. Spielberger CD, Gonzalez-Reigosa F, Martinez-Urrutia A, Natalicio LF, Natalicio DS. The state-trait anxiety inventory. IJP. 1971; 5.
15. Kelleher JD. Deep learning. Massachusetts (USA): MIT press; 2019.
16. Palatnik de Sousa I, Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco M, Costa da Silva E. Local interpretable model-agnostic explanations for classification of lymph node metastases. Sensors. 2019; 19(13):2969.
17. Giorgi FM, Ceraolo C, Mercatelli D. The R language: an engine for bioinformatics and data science. Life. 2022; 12(5):648.
18. Pang B, Nijkamp E, Wu YN. Deep learning with tensor flow: A review. JEBS. 2020; 45(2):227-48.

Матеріал надійшов
до редакції 24.11.2024