

УДК 681.784.7:615.849.19

С.М. ПАШКОВСЬКИЙ, Ю.О. ПИЛИПЕЦЬ, С.В. ПАВЛОВ,
Я.І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ, О.С. ВОЛОСОВИЧ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ЕХОКАРДІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СЕРЦЯ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна

Національний університет «Одеська Політехніка»

ДП «Вінницький науково-дослідний та проектний інститут землеустрою»

Анотація. Ультразвукові зображення серця є важливим джерелом діагностичної інформації для виявлення серцево-судинних захворювань. Сьогодні автоматизована обробка та аналіз таких зображень активно досліджуються у сферах телемедицини, цифрової обробки медичних зображень та штучного інтелекту, зокрема — для пришвидшення і точності діагностики патологій серця. У цій роботі розглядається новий підхід до обробки ехокардіографічних даних, що передбачає перетворення ультразвукових відео або серій зображень у кольорові проекції фазового простору. Це дозволяє створити інформативні візуальні представлення, придатні для аналізу за допомогою глибоких згорткових нейронних мереж. Такий підхід має дві ключові переваги: [1] він забезпечує можливість застосування сучасних архітектур глибокого навчання для розпізнавання серцевих патологій, [2] дає змогу використовувати техніки трансферного навчання, що значно підвищує ефективність моделі навіть на невеликих наборах даних.

Ключові слова: ехокардіографія, біомедичні зображення, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі, обробка зображень, серцеві патології, трансферне навчання, штучний інтелект, діагностика серця, фазовий простір

Abstract. Ultrasound images of the heart are an important source of diagnostic information for the detection of cardiovascular diseases. Today, automated processing and analysis of such images are actively studied in the fields of telemedicine, digital medical image processing, and artificial intelligence, in particular, to accelerate and accurately diagnose cardiac pathologies. This paper considers a new approach to processing echocardiographic data, which involves converting ultrasound videos or series of images into color phase space projections. This allows you to create informative visual representations suitable for analysis using deep convolutional neural networks. This approach has two key advantages: [1] it provides the ability to use modern deep learning architectures for the recognition of cardiac pathologies, [2] it allows the use of transfer learning techniques, which significantly increases the efficiency of the model even on small data sets.

Keywords: echocardiography, biomedical imaging, deep learning, convolutional neural networks, image processing, cardiac pathologies, transfer learning, artificial intelligence, cardiac diagnostics, phase space

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-193-199

ВСТУП

Ультразвукове медичне зображення є одним із ключових інструментів для неінвазивного отримання візуальної інформації про внутрішні органи людини, зокрема серце. Серед усіх методів візуалізації саме ехокардіографія (УЗД серця) відіграє провідну роль у сучасній діагностиці серцево-судинних захворювань, завдяки своїй доступності, безпечності та високій інформативності.

Ультразвукова діагностика серця базується на використанні відбитих ультразвукових хвиль для формування зображення серцевих структур і оцінки їх функціонування. Дані, зібрані з допомогою УЗД-датчика, проходять цифрову обробку, яка включає перетворення, фільтрацію, усунення шумів, реконструкцію зображень та їх подальшу інтерпретацію.

В умовах розвитку цифрової медицини особливого значення набувають інтелектуальні системи обробки ехокардіографічних зображень. Застосування методів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, дає змогу автоматизувати аналіз складних структур серця, проводити сегментацію камер і клапанів, а також здійснювати попередню оцінку функціонального стану міокарда.

Такі технології не лише підвищують точність діагностики, а й забезпечують оперативну обробку великого обсягу даних, що особливо актуально для дистанційного моніторингу та телемедичних систем. Впровадження інтелектуальних підходів в обробку ехокардіографічних зображень сприяє покращенню якості медичних послуг та оптимізації роботи медичних закладів[3,4].

1. ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В КАРДІОЛОГІЧНІЙ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Ехокардіографія – це один із найінформативніших методів дослідження серцево-судинної системи. Використовуючи ультразвукові хвилі, лікар отримує зображення серця в реальному часі, що дозволяє оцінити:

- ✓ Будову серця. Виявлення вроджених або набутих вад.
- ✓ Стан клапанів. Діагностика стенозу або недостатності клапанів.
- ✓ Функціонування серцевого м'яза. Визначення здатності серця перекачувати кров.
- ✓ Наявність рідини в перикарді. Виявлення запальних процесів або патологічного накопичення рідини.

Ехокардіографія є безпечною, безболісною та неінвазивною процедурою, яка не має протипоказань [15].

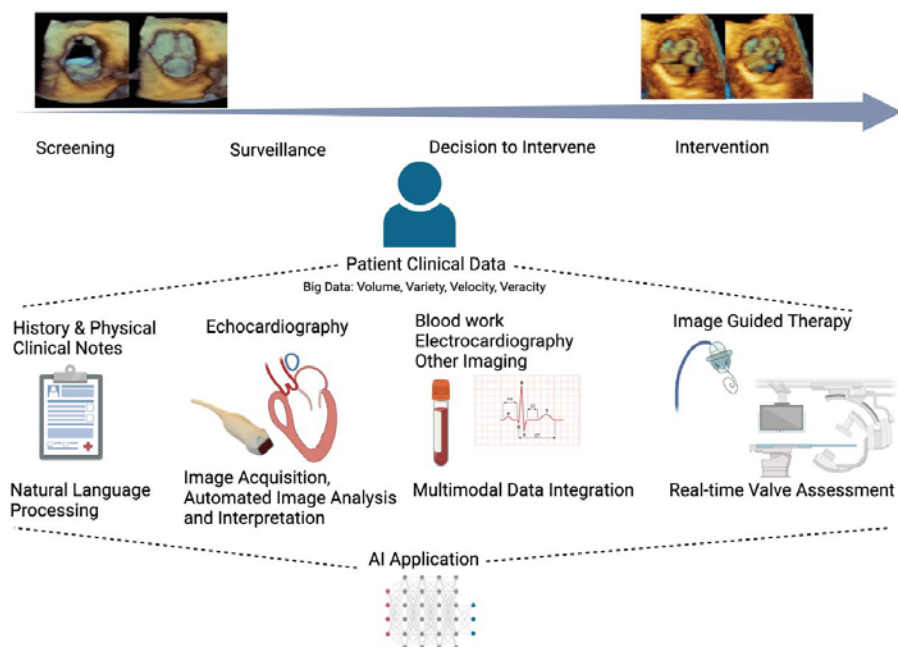


Рисунок 1 – Шлях пацієнта за серцевим захворюванням та сфери діагностики, де інтелектуалізовані системи можуть покращити лікування та ведення пацієнта [13]

Штучний інтелект (ШІ) — це технологія, яка дозволяє виявляти приховані взаємозв'язки між різними змінними (предикторами) та результатами. Його основна перевага полягає у здатності аналізувати великі масиви даних, знаходити складні, у тому числі нелінійні, залежності без необхідності попередніх знань про ці взаємозв'язки. Такі обсяги даних, що охоплюють різні типи інформації та мають

значну швидкість накопичення, називають «великими даними». Їх відрізняють чотири ключові характеристики: обсяг, різноманітність, швидкість обробки та достовірність [5, 7, 16].

Сьогодні пацієнтські дані — це типові приклади великих даних, які включають клінічні показники, зображення медичної візуалізації, електрофізіологічну та геномну інформацію. ШІ дозволяє інтегрувати ці різноманітні джерела та на їх основі формувати точні прогнози. Завдяки доступності потужних обчислювальних ресурсів сучасний ШІ здатен обробляти величезні обсяги даних і приймати складні рішення за значно менший час, ніж це під силу людині.

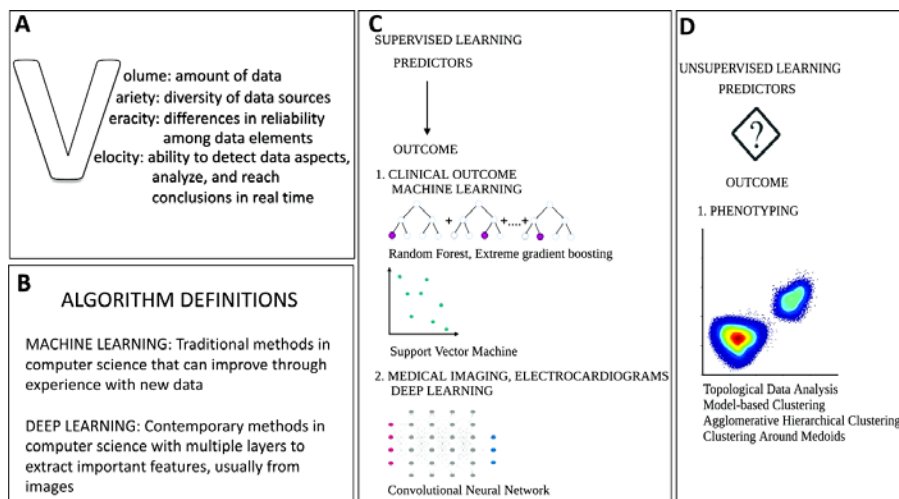


Рисунок 2 – (А) Характеристики великих даних. (В) Загальні визначення ШІ. (С) Загальні архітектури моделей, що використовуються в ШІ, залежать від мети моделювання. (D) За допомогою навчання без учителя предиктори візуалізуються на графіку для знаходження природної кластеризації даних.

Залежно від характеру клінічної задачі, до аналізу медичних даних, зокрема зображень, застосовуються різні алгоритми штучного інтелекту. Серед них найширше використовується згортова нейронна мережа (ЗНМ), яка виявила особливу ефективність у сфері медичної візуалізації. Її архітектура побудована за аналогією із зоровою корою головного мозку людини й дозволяє виділяти важливі характеристики зображення шляхом послідовного застосування фільтрів. Ці особливості потім пов'язуються з відповідними діагностичними висновками. Хоча цей підхід може досягати високої точності, він потребує значних обчислювальних ресурсів та великих обсягів навчальних зображень для ефективного функціонування [6,9].

Сьогодні ШІ вже активно використовується для автоматизованого аналізу ЕКГ, визначення розмірів серцевих камер за даними КТ і МРТ, а також для інтерпретації ехокардіографії — зокрема аналізу деформації серцевого м'яза та доплерівського дослідження у двовимірному форматі. З огляду на провідну роль ехокардіографії у діагностиці серцево-судинних захворювань, саме ця методика є найбільш перспективною для інтеграції алгоритмів штучного інтелекту. Ехокардіографічні дослідження генерують велику кількість даних, включаючи кілька режимів сканування, проєкцій і послідовностей зображень, що створює ідеальне середовище для застосування AI-моделей. Завдяки цьому відкриваються нові можливості для автоматизації візуальної оцінки серцевих клапанів і виявлення нових діагностичних маркерів шляхом фенотипування на основі великих даних.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ОЦІНКИ КЛАПАНІВ НА ЕХОКАРДІОГРАФІЧНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ШІ

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в аналізі ехокардіографічних зображень у пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями охоплює чотири ключові напрями: (1) отримання зображень, (2) розпізнавання зображень, (3) сегментація структур та (4) автоматизоване визначення патологічних станів.

Отримання зображень

У пацієнтів із порушеннями серцевого ритму ехокардіографічна діагностика має на меті формування якісних зображень, які дозволяють оцінити ступінь ураження клапанного апарату серця, а

також його вплив на суміжні анатомічні структури. Зокрема, важливим є чітке візуалізування стулок клапанів, характеристик регургітаційних струменів, джерела турбулентного потоку при стенозах та отримання повного доплерівського сигналу безперервної хвилі (CW). Високоякісне отримання таких зображень потребує відповідної підготовки, особливо в ситуаціях зі складною гемодинамікою або нетиповим розташуванням потоку. Деякі медичні заклади вже впроваджують стандартизовані підходи, як-от система “buddy scan”, для покращення якості досліджень, зокрема при виявленні градієнтів при аортальному стенозі. Проте це залишається трудомістким і часозатратним процесом.

Інтеграція ІІІ у цей етап відкриває перспективи підвищення ефективності шляхом створення програм, що автоматизують процес отримання ехоzображень. Першочергово ці системи орієнтуються на стандартні проекції, такі як парастернальні та апікальні, і демонструють обнадійливі результати. Так, одне з досліджень показало, що медсестри без досвіду, використовуючи алгоритм ІІІ, змогли отримати ехоzображення клапанів серця з високим рівнем діагностичної придатності: 91,7% для аортального клапана, 96,3% — мітрального і 83,3% — тристулкового. Подальший розвиток таких систем дає змогу застосовувати їх на ранніх стадіях для діагностики мітральної чи тристулкової регургітації, а також при доплерівському аналізі аортального стенозу [10,12].

Ідентифікація перегляду

Аналогічно до вже реалізованих алгоритмів, які визначають ехокардіографічні зрізи лівого шлуночка, штучний інтелект (ІІІ) має потенціал значно покращити оцінку клапанної функції. Зокрема, йдеться про можливість автоматичної ідентифікації зображень, які містять інформацію про клапани, що дозволить здійснювати «стекову» інтерпретацію, проводити автоматизовані вимірювання та підтримувати клінічне рішення відповідно до чинних діагностичних рекомендацій.

Такі рішення здатні суттєво зекономити час клініцистів та підвищити якість ехокардіографічних звітів, зменшуючи варіативність оцінки ступеня ураження. Наприклад, у випадку мітральної регургітації рівень узгодженості між різними спеціалістами може сягати лише 61%, що підкреслює потребу у стандартизації оцінки.

Початковим етапом у розробці таких інтелектуальних систем є автоматичне визначення зображень, що включають клапанну анатомію. Незважаючи на наявність багатьох публікацій, присвячених ідентифікації стандартних ехокардіографічних зрізів, лише деякі з них зосереджуються на точному розпізнаванні клапанних структур або доплерівських сигналів. Одне з досліджень описує застосування алгоритму ІІІ для ідентифікації стулок мітрального і тристулкового клапанів в апікальному чотирикамерному зрізі. Система продемонструвала високу точність — 98% для мітрального клапана та 90% для тристулкового [8,13].

Також відзначено успішне визначення доплерівських сигналів, зокрема: точність розпізнавання безперервної хвилі сягала 98%, у той час як для імпульсної хвилі — 83%, що пояснюється візуальною схожістю ПХ-сигналів із низькоамплітудними сигналами CW. Ці результати підтверджують перспективність ІІІ в покращенні точності та ефективності аналізу клапанної функції серця.

Сегментація зображень

Сегментація зображень є ключовим етапом в автоматизованому аналізі медичних зображень на основі штучного інтелекту. Вона дозволяє підвищити точність, об'єктивність і відтворюваність кількісної оцінки структур серця, виконуючи розпізнавання цільових анатомічних об'єктів, окреслення їх меж і проведення відповідних вимірювань.

Цей підхід застосовується як до двовимірних (2D), так і до тривимірних (3D) ехокардіографічних зображень і дозволяє автоматизувати визначення розмірів та функціональних характеристик серцевих камер. Хоча більшість подібних розробок базується на навчальних вибірках із попередньо маркованими зображеннями, поступово з'являються дослідження, в яких створюються алгоритми, здатні виконувати сегментацію без ручного втручання — на основі неструктурованих даних.

Окрім камер серця, алгоритми сегментації можуть бути застосовані для аналізу таких анатомічних структур, як кільце клапанів, стулки, регургітаційні струмені та доплерівські спектральні профілі. Це розширює можливості автоматизованої діагностики і дозволяє здійснювати більш точну та об'єктивну оцінку функціонального стану серця у пацієнтів з серцево-судинними патологіями [11, 17, 18].

Клапанне кільце та стулка

Аналіз клапанного кільця та стулок серцевих клапанів на основі тривимірної ехокардіографії активно впроваджується завдяки використанню як комерційних, так і некомерційних програм, які застосовують методи штучного інтелекту для автоматизованого вимірювання структур серця — зокрема аортального, мітрального та тристулкового клапанів.

Перші програмні рішення у цій галузі здебільшого базувались на класичних обчислювальних алгоритмах, які автоматизували вимірювання за допомогою математичних правил, а не на методах

глибокого навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN). У сучасних версіях програмних продуктів, ймовірно, вже використовуються компоненти штучного інтелекту, хоча через закритість комерційного програмного забезпечення точна інформація про реалізовані алгоритми залишається недоступною.

Загалом, існуючі програмні пакети мають певні обмеження. Зокрема, деякі з них вимагають участі спеціаліста на етапі ініціалізації та налаштування (тобто не є повністю автономними), тоді як інші — сумісні лише з ехокардіографічними зображеннями, отриманими з апаратів конкретного виробника. Це обмежує їхню універсальність і інтеграцію в багатопрофільні медичні системи [13,14].

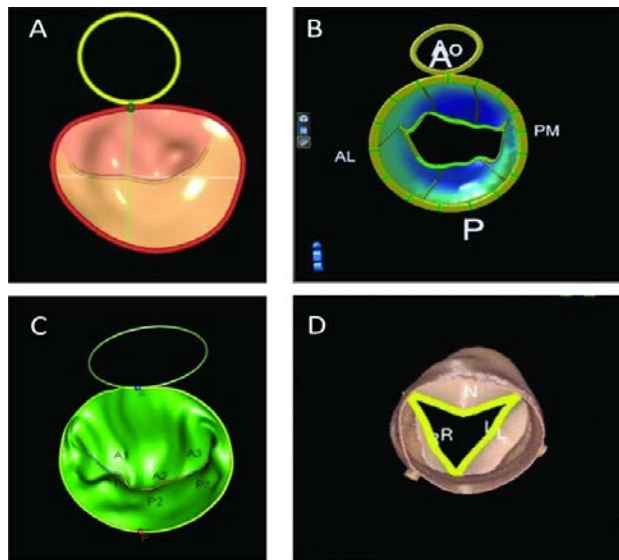


Рисунок 3 – Приклади зображень комерційного програмного забезпечення для аналізу клапанів. Моделі мітрального клапана від (A) GE, (B) Philips та (C) TomTec. (D) Модель аортального клапана від Siemens. A – передній; AL – передньобілатеральний; Ao – аорта; L – ліва коронарна стулка; N – некоронарна стулка; P – задня; PM – постеромедіальна; R – права коронарна стулка

Окрім комерційних рішень, розробляються також некомерційні програмні засоби, спрямовані на підтримку процесу сегментації анатомічних структур серцевих клапанів — зокрема клапанного кільця та стулок. Ці програми зазвичай базуються на архітектурах згорткових нейронних мереж (CNN) і орієнтовані на обробку зображень мітрального клапана.

Ефективність таких систем зазвичай оцінюється за допомогою коефіцієнта Dice, який відображає точність ідентифікації зображення. Отримані значення варіюються від помірного до високого рівня точності, із показниками в діапазоні 0,48–0,79. Водночас рівень помилок у проведенні автоматичних вимірювань залишався відносно низьким: середнє відхилення для периметра кільця становило приблизно $6,1\% \pm 4,5\%$, а для площі — $11,94\% \pm 10\%$.

Однією з ключових переваг цих алгоритмів є їхня здатність ефективно працювати навіть із зображеннями низької якості, що робить їх перспективними для застосування в умовах обмеженої апаратної бази. Основні труднощі, однак, пов'язані з похибками в окресленні меж мітрального клапана, що часто зумовлено артефактами, які можуть спричинити помилкову інтерпретацію анатомічних структур.

3. ВИСНОВКИ

Інтеграція методів штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж, в обробку ехокардіографічних зображень відкриває нові можливості для діагностики серцево-судинних захворювань. Сучасні системи дозволяють автоматизувати ключові етапи аналізу — від отримання якісних зображень до їх розпізнавання, сегментації та інтерпретації функціонального стану серцевих структур.

Автоматизовані інструменти демонструють високу точність в ідентифікації клапанних стулок, аналізі доплерівських сигналів та виконанні кількісних вимірювань. Застосування ШІ дає змогу підвищити об'єктивність діагностики, зменшити залежність від людського фактору та зекономити час

медичних працівників. Особливо перспективним напрямом є сегментація камер серця та клапанних структур, яка забезпечує точні вимірювання навіть на зображеннях низької якості.

Незважаючи на поточні технічні обмеження — як-от потреба в ініціалізації спеціалістом чи обмежена сумісність з апаратним забезпеченням — розвиток як комерційних, так і некомерційних програмних рішень свідчить про стрімке зростання ролі ШІ у сучасній кардіології. Подальші дослідження, орієнтовані на підвищення точності, універсальності та автономності таких систем, сприятимуть ще більш ефективній інтеграції інтелектуальних технологій у клінічну практику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Natsheh, Q.; Şal ˘agean, A.; Zhou, D.; Edirisinghe, E. Automatic Selective Encryption of DICOM Images. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4779. <https://doi.org/10.3390/app13084779>
2. Monika, R.; Dhanalakshmi, S.; Rajamanickam, N.; Yousef, A.; Alroobaea, R. Coefficient-Shuffled Variable Block Compressed Sensing for Medical Image Compression in Telemedicine Systems. *Bioengineering* 2024, 11, 1101. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11111101>
3. Lin, C.-C.; Lin, Y.-H.; Chu, E.-T.; Tai, W.-L.; Lin, C.-J. VUF-MIWS: A Visible and User-Friendly Watermarking Scheme for Medical Images. *Electronics* 2025, 14, 122. <https://doi.org/10.3390/electronics14010122>
4. Ferreira, F.; Pires, I.M.; Ponciano, V.; Costa, M.; Villasana, M.V.; Garcia, N.M.; Zdravevski, E.; Lameski, P.; Chorbev, I.; Mihajlov, M.; et al. Experimental Study on Wound Area Measurement with Mobile Devices. *Sensors* 2021, 21, 5762. <https://doi.org/10.3390/s21175762>
5. Eric J. Topol: High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine* 2019, 25, 44-56. <https://gwern.net/doc/ai/nn/2019-topol.pdf>
6. Harimi, A.; Majd, Y.; Gharahbagh, A.A.; Hajhashemi, V.; Esmailyan, Z.; Machado, J.J.M.; Tavares, J.M.R.S. Classification of Heart Sounds Using Chaogram Transform and Deep Convolutional Neural Network Transfer Learning. *Sensors* 2022, 22, 9569. <https://doi.org/10.3390/s22249569>
7. Lesport, Q.; Joerger, G.; Kaminski, H.J.; Girma, H.; McNett, S.; Abu-Rub, M.; Garbey, M. Eye Segmentation Method for Telehealth: Application to the Myasthenia Gravis Physical Examination. *Sensors* 2023, 23, 7744. <https://doi.org/10.3390/s23187744>
8. Harun-Ar-Rashid, M.; Chowdhury, O.; Hossain, M.M.; Rahman, M.M.; Muhammad, G.; AlQahtani, S.A.; Alrashoud, M.; Yassine, A.; Hossain, M.S. IoT-Based Medical Image Monitoring System Using HL7 in a Hospital Database. *Healthcare* 2023, 11, 139. <https://doi.org/10.3390/healthcare11010139>
9. Ferreira, F.; Pires, I.M.; Ponciano, V.; Costa, M.; Villasana, M.V.; Garcia, N.M.; Zdravevski, E.; Lameski, P.; Chorbev, I.; Mihajlov, M.; et al. Experimental Study on Wound Area Measurement with Mobile Devices. *Sensors* 2021, 21, 5762. <https://doi.org/10.3390/s21175762>
10. Zanella A, Bui N, Castellani A et al. (2014) Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal* 1(1): 22-32. 6. Zeng Y, Zhang L, Gupta P (2019) Internet of things (IoT) in healthcare: A comprehensive survey on trends and advances. *IEEE Access* 7: 115365-115381.
11. Nedadur R, Wang B, Tsang W Artificial intelligence for the echocardiographic assessment of valvular heart disease *Heart* 2022;108:1592-1599
12. Jiang, L., Zuo, H. J., & Chen, C. (2025). Artificial intelligence in echocardiography: Applications and future directions. *Fundamental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2025.01.020>
13. Labs, R. B., Zolgharni, M., & Loo, J. P. (n.d.). *Echocardiographic image quality assessment using deep neural networks*. School of Computing and Engineering, University of West London; National Heart and Lung Institute, Imperial College, London, UK.
14. Liu, W., Wang, Q., Zhang, P., Deng, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., Xu, H., Qiu, X., Chen, X., Xu, J., & He, K. (2025). Automated echocardiogram image quality assessment with YOLO and ResNet in the left ventricular myocardium of A4C views. *Applied Intelligence*, 55, Article 513. <https://doi.org/10.1007/s10489-025-06419-z>
15. Ivanushkina, N. H., & Ivanko, K. O. (2014). Digital processing of low-amplitude components of electrocardiosignals. Mykolaiv: FOP Shvets V. D.
16. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
17. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

18. Y. Pylypets, S. Pavlov, Y. Yaroslavsky, S. Kostyuk, and M. Ursan, "Features of the application of telemedical technologies based on artificial intelligence in disaster medicine," Opt-el. inf-energ. tech., vol. 48, no. 2, pp. 190–195, Nov 2024.

Надійшла до редакції 05.02.25 р.

ПАШКОВСЬКИЙ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ – к.м.н., полковник медичної служби, начальник Військово-медичного клінічного центру Центрального регіону, м. Вінниця, Україна,
e-mail: y-vmkc@ps.mil.gov.ua

ПИЛИПЕЦЬ ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, офіцер відділення зв'язку, Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна, **e-mail: y.hopanchuk@med.mil.ua**

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: psv@vntu.edu.ua

ЯРОСЛАВСЬКИЙ ЯРОСЛАВ ІВАНОВИЧ – к.т.н., старший викладач кафедри біомедичної інженерії, Національний університет «Одеська Політехніка, директор, ДП «Вінницький науково-дослідний та проектний інститут землеустрою», Вінниця, Україна,
e-mail: yaroslavskyidzk@gmail.com

ВОЛОСОВИЧ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021; **e-mail: sashka.v0@gmail.com**

SERHII PASHKOVSKIY, YULIIA PYLYPETS, SERGII PAVLOV,
YAROSLAV YAROSLAVSKYY, OLEKSANDR VOLOSOVYCH
**INTELLIGENT ECHOCARDIOGRAPHIC IMAGE PROCESSING SYSTEMS FOR ASSESSING
THE FUNCTIONAL STATE OF THE HEART**
Military Medical Clinical Center of the Central Region, Vinnytsia, Ukraine
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
Odessa Polytechnic National University, SE "Vinnytsia Research and Design Institute of Land Management",
Vinnytsia, Ukraine