

УДК 004.048 + 616-079.4

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-2>

### **Ольга БОЙКО**

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій, Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, 40007

ORCID: 0000-0001-8557-2267

### **Михайло ТАТАРЕНКО**

аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, 40007

ORCID: 0009-0000-9649-4620

**Бібліографічний опис статті:** Бойко, О., Татаренко, М. (2024). Моделі та інформаційна технологія обробки ультразвукових знімків. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 10–16, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-2>

## **МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗНІМКІВ**

Тривимірні ультразвукові зображення відкривають нові горизонти в медичній діагностиці та лікуванні. Вони пропонують набагато більше інформації порівняно зі звичайними двовимірними зображеннями, дозволяючи лікарям «обертати» та «перевертати» зображення, щоб дослідити його з усіх можливих ракурсів. Така деталізація може виявитися критично важливою при виявленні патологій або плануванні хірургічних втручань. Однак, для ефективної роботи з такими зображеннями потрібно спеціалізоване програмне забезпечення, моделі та інформаційні технології, які здатні обробити великі об'єми даних та відтворити їх у вигляді інтуїтивно зрозумілих 3D-моделей. Розробка такого роду програмного забезпечення вимагає врахування численних технічних та медичних аспектів.

**Метою статті** є аналіз моделей та інформаційних технологій для обробки ультразвукових знімків, що мають велике значення в медичній діагностиці. Розглянути та порівняти різні методи та моделі, які можуть забезпечити найкращі результати для обробки зображень.

**Методологія** полягає у застосованні наступних методів наукового пошуку: аналіз, синтез, порівняння, узагальнення – для розгляду основних аспектів досліджуваної проблеми, визначення теоретичних основ дослідження. У статті розглянуто основні підходи до моделювання процесів обробки ультразвукових зображень, включаючи методи покращення якості зображень, виділення контурів та структурних елементів. Описано алгоритми і програмні засоби, що забезпечують ефективну обробку і аналіз ультразвукових даних.

**Наукова новизна** отриманих у роботі результатів полягає в формулюванні та використанні найкращих методів та моделей та інформаційних технологій для обробки ультразвукових знімків, що мають велике значення в медичній діагностиці. Увага приділяється методам фільтрації шуму, контрастування зображень та автоматичного розпізнавання патологій. Наведено результати досліджень, що демонструють ефективність запропонованих підходів у клінічній практиці.

**Висновки.** Методи які були розглянуті спрощують використання сучасних алгоритмів для автоматизованого аналізу ультразвукових знімків. Огляд наявних інструментів демонструє, що 3D Slicer пропонує дослідникам зручні графічний та програмний інтерфейси, що полегшують впровадження і застосування новітніх алгоритмів машинного навчання в обробці ультразвукових зображень. Стаття також обговорює перспективи подальшого розвитку інформаційних технологій в ультразвуковій діагностиці.

**Ключові слова:** ультразвукова діагностика, ультразвукові зображення, розпізнавання зображень, нейронна мережа, модель, інформаційна технологія.

### **Olga BOYKO**

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Information Technology, Sumy State University, 116 Kharkivska Str., Sumy, Ukraine, 40007, o.boiko@cs.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8557-2267

### **Mykhailo TATARENKO**

Postgraduate student of the Computer Science Department, Sumy State University, 116 Kharkivska Str., Sumy, Ukraine, 40007, m.tatarenko98@gmail.com

ORCID: 0009-0000-9649-4620

**To cite this article:** Boyko, O., Tatarenko, M. (2024). Modeli ta informatsiina tekhnolohiia obrobky ultrazvukovykh znmkiv [Models and information technology of processing ultrasound images]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 10–16, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-2>

## MODELS AND INFORMATION TECHNOLOGY OF PROCESSING ULTRASOUND IMAGES

*Three-dimensional ultrasound images offer much more information compared to conventional two-dimensional images, allowing doctors to “rotate” and “flip” the image to explore it from all possible angles. This level of detail can be critical for detecting pathologies or planning surgical interventions. However, effectively working with such images requires specialized software, models, and information technologies capable of processing large volumes of data and reproducing them as intuitive 3D models. Developing this kind of software requires consideration of numerous technical and medical aspects.*

**The purpose** is to analyze the models and information technologies for processing ultrasound images, which are of great importance in medical diagnostics. The article considers and compares various methods and models that can provide the best results for image processing.

**The methodology** involves the following scientific research methods: analysis, synthesis, comparison, and generalization to consider the main aspects of the studied problem and define the theoretical foundations of the research. The article reviews the main approaches to modeling the processes of ultrasound image processing, including methods for improving image quality, extracting contours, and structural elements. Algorithms and software tools that ensure effective processing and analysis of ultrasound data are described.

**The scientific novelty** of the results obtained in the work lies in the formulation and use of the best methods, models, and information technologies for processing ultrasound images, which are of great significance in medical diagnostics. Attention is given to noise filtering methods, image contrast enhancement, and automatic pathology recognition. The research results demonstrating the effectiveness of the proposed approaches in clinical practice are presented.

**Conclusions.** The methods reviewed simplify the use of modern algorithms for automated analysis of ultrasound images. The review of available tools shows that 3D Slicer offers researchers convenient graphical and software interfaces that facilitate the implementation and application of the latest machine learning algorithms in ultrasound image processing. The article also discusses the prospects for further development of information technologies in ultrasound diagnostics.

**Key words:** ultrasound diagnostics, ultrasound images, image recognition, neural network, model, information technology.

**Актуальність проблеми.** Одним із основних шляхів підвищення достовірності медичних досліджень є створення нових апаратно-програмних засобів вторинної обробки ультразвукових зображень на основі комп'ютерних технологій.

Беручи до уваги різноманітність діагностичних параметрів, що використовуються для встановлення діагнозу по конкретному ультразвуковому зображенню, існує багато специфічних задач, до кінця не розв'язаних, оскільки методи цифрової обробки не завжди задовольняють вимоги, що висуваються до діагностичних засобів для виявлення ряду. Тому підвищення достовірності оцінки стану при ультразвуковому дослідженні залишається актуальною задачею, розв'язком якої є подальше вдосконалення наявних і розробка принципово нових діагностичних методів, які безпосередньо пов'язані з обробленням ультразвукових зображень, та створення на їх основі біомедичних діагностичних засобів (Білинський та ін., 2022: с. 7).

Для запобігання ненавмисному заподіяння шкоди пацієнтам, широко застосовуються неінвазивні методи діагностики: сонографія, комп'ютерна томографія і магнітно-резонансна

томографія. Порівняно з біопсією дані методи мають суттєві переваги, такі як: відсутність оперативного втручання, низька вартість, уточнення етіології хвороби, прогнозування перебігу захворювання і ефективності терапії. Дані методи широко використовуються для візуалізації печінки та клінічної діагностики. Проте, на постановку діагнозу значно впливає якість ультразвукових зображень, так само як знання і досвід радіологів (Настенко та ін., 2020: с. 77).

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Сфера тривимірної ультразвукової візуалізації продовжує захоплювати науковців та фахівців у медичній галузі, зокрема завдяки її потенціалу у діагностиці та лікуванні. Наукова спільнота активно розробляє нові методи й підходи до створення точних та якісних 3D зображень, що спрощують медичну діагностику.

Ключовим етапом у розвитку цієї технології стало дослідження Кадзунорі Баба в середині 1980-х років, коли він вперше демонстрував можливість створення трьохвимірних зображень на основі двовимірних знімків. За два роки, вдосконалені методики дали змогу отримати 3D зображення плоду, встановлюючи нові стандарти у сфері медичної візуалізації.

Однак технічні обмеження того періоду зумовили необхідність подальшого розвитку методології та вдосконалення технічних рішень. Найбільше прогресу було досягнуто завдяки інтеграції новітніх технологій у комп'ютерній інженерії та застосуванню нових датчиків, призначених спеціально для 3D зображення.

Сучасні дослідження в даній галузі фокусуються на оптимізації алгоритмів обробки, підвищенні швидкості сканування та створенні більш точних моделей для візуалізації різних органів та тканин людського організму. Зокрема, спеціалісти працюють над розробкою програмного забезпечення, яке може адаптуватися до індивідуальних особливостей пацієнтів, а також інтегруватися з іншими медичними системами (Федорін, 2023: с. 4).

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на досягнення у вивченні даної теми, наразі майже відсутній системний аналіз всіх процесів реєстрації звукової голограми та формування її дискретної математичної моделі, а також ефективні комп'ютерні методи реконструкції діагностичних ультразвукових зображень з високим просторовим і контрастним розрізненням.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).**

**Мета статті** – проаналізувати моделі та інформаційні технології для обробки ультразвукових знімків. Завдання статті – розглянути та порівняти різні методи та моделі, які можуть забезпечити найкращі результати для обробки зображень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Застосування засобів обчислювальної техніки практично в будь-яких системах і на всіх етапах обробки сигналів є перспективним напрямком ультразвукової діагностики. Використання останніх досягнень електроніки дозволяє, з одного боку, підвищити роздільну здатність діагностичних ультразвукових приладів, з іншого – зробити їх портативними, автоматизувати і спростити системи управління, а з часом і знизити собівартість.

В якості математичної моделі звукової голограми неоднорідностей (дефектів) в сканованому об'ємі матеріалу може бути прийнятий дифракційний інтеграл Релє-Зоммерфельда, а також, взаємнооднозначна відповідність голограмного опису і відновленого зображення дефектів сканованого середовища визначається парою одновимірних або двовимірних Френель-Фур'є перетворень.

Метод реконструкції діагностичних зображень середовища, полягає в наступному:

а) декомпозиції досліджуваного середовища на елементарні об'єми, відповідні послідовним просторово-часовим положенням звукового імпульсу в звуковому промені;

б) реєстрації одновимірних фазових (амплітудно-фазових) звукових голограм, відповідних елементарним об'ємам досліджуваного середовища (об'єкту);

в) реконструкції зображень (інтенсивності коливань сигналів) точок неоднорідностей на акустичній осі звукового променя по відповідним одновимірним голограмам елементарних об'ємів досліджуваного середовища і компоненток одержаних зображень точок в растрову лінію зображення;

г) компоновка растрових ліній в акустичне зображення площинного перетину досліджуваного середовища (Мартинюк, 2021: с. 63-64).

Для класифікації ультразвукових зображень застосовують згорткову нейронну мережу. В задачах розпізнавання образів та обробки зображень використовується широкий спектр нейронних мереж, кожні з яких мають свої переваги та недоліки.

В роботі (Заболуєва і Момот, 2022: с. 171-173) розглянуті моделі нейромереж, які успішно застосовуються в задачах класифікації ультразвукових зображень. При порівнянні характеристик найкращою для авторів виявилась модель EfficientNet. Для покращення якості та зручності роботи системи пропонується створити інтерфейс на базі модулю Vision Development у середовищі LabVIEW.

Однією з найкращих моделей, успішно застосованих в задачах класифікації зображень, є мережа VGG16. Модель досягає точності 92.7% при тестуванні у задачі розпізнавання об'єктів на зображенні, також її легко реалізувати. Проте, мережа VGG16 має два значних недоліки: дуже повільна швидкість навчання, архітектура мережі важить надто багато, у подальшому з'являються проблеми з диском та пропускнуою здатністю.

Мережа MobileNet – невелика модель з низькою затримкою та малопотужними параметрами, що використовується за умов обмежень ресурсів. Модель MobileNet може бути створена для вирішення задач класифікації, сегментації та кластеризації, як і інші популярні великомасштабні моделі. Але MobileNet поступається точністю, яка, для задач класифікації, становить 70,6%.

EfficientNets – це серія моделей, що застосовуються для класифікації зображень, і які можуть забезпечити дуже високу точність, 95,1%. В основі розробки моделей EfficientNets

лежить алгоритм складового масштабування та балансування кількості каналів згорткових нейронних мереж. Згідно з дослідженням (Mingxing & Le, 2019: с. 6109) балансування ширини, глибини і роздільної здатності мережі має важливе значення, і цей баланс може бути досягнутий шляхом рівномірного масштабування кожного значення з фіксованими пропорціями між ними. Модель EfficientNet досягає значно вищої точності порівняно з попередніми моделями, має менше параметрів та швидше навчається. Виходячи з даних характеристик, найоптимальніше обрати модель EfficientNet для задачі класифікації ультразвукових зображень (Заболуєва і Момот, 2022: с. 171-173).

Розглядаючи існуючі аналоги системи для обробки та аналізу медичних зображень, слід враховувати, що існує безліч програмних рішень та платформ, які спрямовані на обробку медичних зображень та надання підтримки для лікарів у діагностуванні та лікуванні пацієнтів. Деякі з популярних аналогів та систем, які варто розглянути, включають наступні:

- OsiriX: OsiriX (2024) є відкритою медичною платформою для обробки медичних зображень, особливо в сфері обробки зображень у сфері рентгенології та КТ. Вона має велику кількість функцій, включаючи 2D та 3D візуалізацію, сегментацію, аналіз та підтримку DICOM;

- Horos: Horos є безкоштовною та відкритою аналогічною платформою, яка розробляється для обробки медичних зображень, зокрема для системи macOS. Вона підтримує обробку DICOM-зображень та має корисні функції, такі як сегментація та 3D візуалізація;

- 3D Slicer: 3D Slicer (2022) – це безкоштовна та відкрита платформа для обробки медичних зображень, яка надає розширені можливості сегментації, візуалізації та аналізу. Вона використовується у багатьох дослідницьких проєктах та медичних дослідженнях;

- MATLAB та Image Processing Toolbox: MATLAB – це популярний інструмент для обробки медичних зображень, який має високорівневі функції для сегментації, аналізу та обробки зображень. Image Processing Toolbox дозволяє легко використовувати MATLAB для роботи з медичними зображеннями;

- Python та бібліотеки для обробки зображень: Python має багато бібліотек для обробки медичних зображень, включаючи PyDicom, SimpleITK, та бібліотеки для глибокого навчання, такі як TensorFlow та PyTorch;

- RADLogics. RADLogics розробляє рішення на основі штучного інтелекту, які підтримують аналіз зображень, щоб підвищити

продуктивність радіологів і покращити результати лікування пацієнтів;

- Butterfly Network – це компанія, що виробляє портативні ультразвукові пристрої та розвиває інноваційні технології у сфері медичних зображень. Основною їхньою розробкою є Butterfly iQ, портативний ультразвуковий апарат, який може бути підключений до смартфонів та планшетів. Він відзначається тим, що має один універсальний трансдюсер, який дозволяє проводити різні типи ультразвукових досліджень (Кравчук, 2024: с. 26-29).

З метою досягнення точності та надійності класифікації ультразвукових зображень, розглядають різні архітектури нейромереж, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та їх комбінації. Оцінка та порівняння ефективності цих моделей проводять на основі метрик класифікації та порівняння з результатами попередніх досліджень.

Наприклад, архітектура ResNet (Residual Neural Network) для класифікації ультразвукових зображень відома своєю здатністю ефективно працювати з дуже глибокими нейронними мережами та вирішувати проблему зникаючого градієнту (vanishing gradient). Одна з особливостей ResNet полягає у використанні «skip connections» або «residual connections» – додаткових шляхів, що об'єднують вихідні дані попередніх шарів з вхідними даними на поточному шарі. Це дозволяє градієнту здійснювати «прямий потік» через нейромережу та уникнути його зникнення. Таким чином, ResNet забезпечує більш ефективне навчання глибоких моделей та запобігає затуханню градієнту, що дозволяє досягнути кращої точності при класифікації зображень. У табл. 1 зібрано дані для порівняння різних нейромереж для класифікації зображень (Акерман, 2023: с. 66).

Вдосконалення методів вторинної обробки ультразвукового зображення є альтернативою розвитку апаратної частини УЗД-приладу. Методи фільтрації ультразвукових зображень покликані полегшити сприйняття зображення та виділення необхідних діагностичних параметрів, мінімізуючи неточності, що можуть бути внесені людським фактором у процес інтерпретації його. Використання методів вторинної обробки дозволяє автоматизувати процес визначення діагностичних параметрів ультразвукових зображень.

Методи цифрової обробки зображень дають змогу певною мірою компенсувати такі недоліки зображення як наявність спекл-шуму, низький рівень контрасту, розмитість країв об'єктів

Таблиця 1

**Порівняння різних нейромереж для класифікації зображень**

Тип нейромережі	Точність (%)	Чутливість (%)	Специфічність (%)	Час навчання (год)
Згорткові мережі	92	89	93	12
Вейвлетні мережі	87	85	88	10
Рекурентні нейромережі	90	88	91	15
Конволюційні рекурентні нейромережі	94	91	95	18
Трансформери	93	90	94	20
Глибокі нейромережі з перед-обробкою даних	95	92	96	14

і здійснити повний цикл локалізації та розпізнавання об'єктів, що становлять діагностичну цінність (Білінський та ін., 2022: с. 32).

Таким чином, ультразвукові знімки використовуються дослідниками для аналізу та пошуку закономірностей, характерних для різних патологій. Поширеним інструментом для роботи з такими зображеннями є мова програмування Python та безліч бібліотек комп'ютерного бачення, побудови моделей машинного навчання (у тому числі нейронних мереж), аналізу зображень.

Можливості Python в області аналізу зображень великі, але складність використання висока. Навіть простий функціонал потребує навичок програмування, що обмежує лікаря у його використанні.

Пошук альтернативних підходів може показати, що ефективнішим рішенням буде використання програмного забезпечення на основі віконного інтерфейсу, що має можливості розширення свого базового функціоналу.

Повною мірою даному критерію відповідає пакет візуалізації 3D Slicer. Ця програма може використовуватися в дослідженнях та клінічній практиці для аналізу, візуалізації та планування лікування.

Користувач може імпортувати медичні зображення з різних джерел, таких як DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), CT, MRI, PET та інші. 3D Slicer надає широкий спектр інструментів для обробки даних, таких як фільтри для покращення якості зображень, реєстрація зображень для вирівнювання даних із різних джерел, а також сегментація виділення певних областей.

Програма дозволяє візуалізувати дані у 2D та 3D, будувати об'ємні моделі, створювати поверхні з об'ємних даних, відображати зрізи зображень та проводити віртуальні операції. 3D Slicer забезпечує засоби для аналізу даних, такі як вимірювання розмірів структур, взаємодія із зображеннями та моделями, а також

маніпуляції з областями інтересу. Програма підтримує безліч плагінів та інструментів, що дозволяє розширювати її функціональність та використовувати додаткові інструменти для специфічних завдань.

Поряд із візуалізацією є ряд можливостей, що дозволяють отримати якісні та кількісні характеристики досліджуваних органів, а також конвертувати отримані зображення в моделі для 3D-друку, якщо це необхідно.

Поряд із додатковими модулями, що розробляються спеціально для 3D Slicer, існує можливість підключення зовнішнього коду, наприклад, нейронних мереж. Ця функція дозволяє використовувати найсучасніші засоби аналізу медичних зображень для досліджень.

**Висновки і перспективи подальших досліджень**

У процесі проведеного дослідження було проаналізовано моделі та інформаційні технології обробки ультразвукових знімків, які значно підвищують якість медичної діагностики. Розглянуті методи фільтрації шуму, контрастування зображень, сегментації та автоматичного розпізнавання патологій демонструють високу ефективність у реальних клінічних умовах. Інтеграція цих алгоритмів у медичні інформаційні системи сприяє скороченню часу обробки зображень та підвищенню точності діагностичних висновків.

Показано важливість пошуку засобів, що спростують застосування сучасних алгоритмів автоматизації аналізу ультразвукових зображень. Аналіз існуючих інструментів показує, що 3D Slicer надає досліднику зручний графічний та програмний інтерфейс, що дозволяє досліджувати та використовувати сучасні алгоритми машинного навчання в обробці ультразвукових зображень. Перспективи подальших досліджень включають розвиток і удосконалення алгоритмів на основі штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення автоматизації обробки зображень.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Білінський Й. Й., Нікольський О. І., Дмитрієва К. Ю., Гуральник А.Б. І. Вінниця: ВНТУ, 2022. 108 с. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36848>
2. Настенко Є. А., Павлов В. А., Гончарук М. О., Бабенко В. О. Класифікація ультразвукових зображень печінки за значеннями матриці суміжності градацій сірого. III міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи та технології в медицині» (ISM–2020: збірник наукових праць. Харків, 2020.
3. Федорін І., Кройс Н. Програмний додаток для візуалізації та обробки трьохвимірних ультразвукових зображень. Наука і техніка сьогодні. 2023. № 12 (26). С. 806–819. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-806-819](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-806-819)
4. Мартинюк І. С. Алгоритми обробки ультразвукових зображень поверхневих органів для підвищення ефективності діагностики. Національний авіаційний університет, 2021.
5. Заболуєва М. Ю., Момот А. С. Автоматизація ультразвукової діагностики захворювань молочних залоз із використанням нейронних мереж. XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 14-15 червня 2022 р., м. Київ: збірник праць конференції. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 170–173. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53620>
6. Mingxing T., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. International Conference on Machine Learning. PMLR. 2019. P. 6105–6114.
7. OsiriX DICOM Viewer | The world famous medical imaging viewer, 2024. URL: <https://www.osirix-viewer.com/>
8. 3D Slicer image computing platform (2022) URL: <https://www.slicer.org/>
9. Кравчук Ю. О. Система для обробки та аналізу медичних зображень. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
10. Акерман Д. О. Класифікація медичних зображень УЗД печінки за допомогою штучної нейронної мережі. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64756>

#### REFERENCES:

1. Bilinskyi, Y. Y., Nikolskyi, O. I., Dmitrieva, K. Yu., Guralnyk, A. B. (2022). Method i ultrazvukovyy zasib dlya otsynuyannya stanu kulshovoho sugloba: monohrafiya [Method and ultrasound tool for assessing the state of the hip joint: monograph]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36848> [in Ukrainian].
2. Nastenko, E. A., Pavlov, V. A., Honcharuk, M. O., Babenko, V. O. (2020). Klasyfikatsiya ultrazvukovykh zobrazhen pechinky za znachennyamy matrytsi sumizhnosti gradatsiy sirogo [Classification of ultrasound images of the liver by the values of the adjacency matrix of gray gradations]. Proceedings from ISM '20: *III mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Informatsiyni systemy ta tekhnolohiyi v medytsyni» – III international scientific and practical conference «Information systems and technologies in medicine»*. Kharkiv. [in Ukrainian].
3. Fedorin, I., & Krois, N. (2023). Programnyy dodatok dlya vizualizatsiyi ta obrobki tryokhvymirnykh ultrazvukovykh zobrazhen [Software application for visualization and processing of three-dimensional ultrasound images]. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and Technology Today*, 12(26), 806–819. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-806-819](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-806-819) [in Ukrainian]
4. Martyniuk, I. S. (2021). Alhorytmy obrobky ultrazvukovykh zobrazhen poverkhnevyykh orhaniv dlya pidvyshchennya efektyvnosti diahnostyky. [Algorithms for processing ultrasonic images of superficial organs to increase the efficiency of diagnostics]. National Aviation University. [in Ukrainian].
5. Zaboluyeva, M. Yu., Momot, A. S. (2022). Avtomatyzatsiya ultrazvukovoyi diahnostyky zakhvoryuvan' molochnykh zaloz iz vykorystannyam neyronnykh merezh. [Automation of ultrasound diagnosis of mammary gland diseases using neural networks]. Proceedings from: *XV Naukovo-praktychna konferentsiya studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Pohlyad u maybutnye pryladobuduvannya» – XV Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists «Looking into the future of instrument building»*. (pp. 170–173). Kyiv, KPI named after Igor Sikorskyi, Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53620> [in Ukrainian].
6. Mingxing, T., Le, Q. (2019). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. Proceedings from: International Conference on Machine Learning. (pp. 6105–6114). [in English].
7. OsiriX DICOM Viewer | The world famous medical imaging viewer [OsiriX DICOM Viewer | The world famous medical imaging viewer] [www.osirix-viewer.com](http://www.osirix-viewer.com). Retrieved from: <https://www.osirix-viewer.com/> [in English].

8. 3D Slicer image computing platform [3D Slicer image computing platform]. *www.slicer.org*. Retrieved from: <https://www.slicer.org/> [in English].
9. Kravchuk, Yu. O. (2024). *System dlya obrobky ta analizu medychnykh zobrazhen [System for processing and analysis of medical images]*. KPI named after Igor Sikorskyi. [in Ukrainian].
10. Akerman, D. O. (2023). *Klasyfikatsiya medychnykh zobrazhen UZD pechinky za dopomohoyu shtuchoyi neyronnoyi merezhi. [Classification of medical images of ultrasound of the liver using an artificial neural network]*. KPI named after Igor Sikorskyi. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64756> [in Ukrainian].