

УДК 004.932.4:616-073.97

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.2>

Ольга БОЙКО

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій, Сумський державний університет, o.boiko@cs.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8557-2267

Михайло ТАТАРЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, m.tatarenko98@gmail.com

ORCID: 0009-0000-9649-4620

МЕТОДИ СУПЕРРЕЗОЛЮЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ДЕТАЛІЗАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. У роботі досліджено можливості застосування методів суперрезолюції для покращення просторової деталізації ультразвукових зображень у медичній діагностиці. Актуальність теми зумовлена обмеженнями апаратної роздільної здатності традиційних ультразвукових систем, що лімітує точність візуалізації дрібних анатомічних структур та ускладнює постановку клінічного діагнозу.

Метою статті є комплексне обґрунтування ефективності та доцільності впровадження методів суперрезолюції до ультразвукової діагностики шляхом системного аналізу їхніх технічних характеристик, механізмів підвищення якості реконструкції зображень та чинників, що впливають на можливості клінічного використання.

Методологію дослідження сформовано на основі узагальнення сучасних підходів до оптимізації архітектур моделей, підготовки вхідних даних, попереднього навчання та клінічної валідації результатів. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу переваг трансформерних моделей, як-от SwinIR, у контексті медичної візуалізації.

У роботі охарактеризовано основні фактори втрати просторової деталізації в УЗ-зображеннях, систематизовано класифікацію методів суперрезолюції за технічними параметрами, проаналізовано організаційні бар'єри впровадження алгоритмів до клінічного середовища, а також розроблено обґрунтовані рекомендації щодо інтеграції таких рішень до медичної інфраструктури.

У результаті дослідження встановлено, що нейронні моделі суперрезолюції, зокрема архітектури на базі згорткових мереж та трансформерів, мають високий потенціал підвищення якості УЗ-зображень без потреби в оновленні апаратного забезпечення. Виявлено ключові проблеми, пов'язані з нестачею маркованих УЗ-даних, складністю дотримання стандартів DICOM і PACS, а також етичними аспектами медичної відповідальності. У роботі доведено, що успішне впровадження методів суперрезолюції потребує адаптації алгоритмів до специфіки медичних систем, поетапної інтеграції до наявних ПЗ-рішень, збереження контролю лікаря та забезпечення відповідності нормативним вимогам.

Наукову новизну становить комплексний аналіз способів підвищення ефективності алгоритмів суперрезолюції в ультразвуковій візуалізації та визначення напрямів їхнього оптимального використання в медичній практиці.

Ключові слова: ультразвукова діагностика, просторове розрізнення, клінічна інтерпретованість, трансформерна модель, нейронна мережа.

Olga BOYKO, Mykhailo TATARENKO. SUPER-RESOLUTION METHODS FOR IMPROVING THE DETAILS OF ULTRASOUND IMAGES

Abstract. The paper investigates the possibilities of using super-resolution methods to improve the spatial detail of ultrasound images in medical diagnostics. The relevance of the topic is due to the limitations of the hardware resolution of traditional ultrasound systems, which limits the accuracy of visualization of small anatomical structures and complicates the clinical diagnosis.

The purpose of the article is to provide a comprehensive justification for the effectiveness and feasibility of introducing super-resolution methods into ultrasound diagnostics by systematically analyzing their technical characteristics, mechanisms for improving the quality of image reconstruction, and factors affecting the possibilities of clinical use.

The research methodology is based on the generalization of modern approaches to the optimization of model architectures, preparation of input data, pre-training and clinical validation of results. Particular attention is paid to a comparative analysis of the advantages of transformable models, such as SwinIR, in the context of medical visualization.

The paper characterizes the main factors of loss of spatial detail in ultrasound images, systematizes the classification of superresolution methods by technical parameters, analyzes organizational barriers to the implementation of algorithms in the clinical environment, and develops reasonable recommendations for the integration of such solutions into medical infrastructure.

The study found that neural models of superresolution, in particular, architectures based on convolutional networks and transformers, have a high potential for improving the quality of ultrasound images without the need to upgrade hardware. The key problems associated with the lack of labeled ultrasound datasets, the difficulty of complying with DICOM and PACS standards, and the ethical aspects of medical liability are identified. The paper proves that successful implementation of super-resolution methods requires adaptation of algorithms to the specifics of medical systems, gradual integration into existing software solutions, maintaining physician control, and ensuring compliance with regulatory requirements.

The scientific novelty is a comprehensive analysis of ways to improve the efficiency of superresolution algorithms in ultrasound imaging and to determine the directions of their optimal use in medical practice.

Key words: ultrasound diagnostics, spatial resolution, clinical interpretability, transformer model, neural network.

Вступ. Ультразвукова візуалізація є одним із найпоширеніших неінвазивних методів медичної діагностики, що забезпечує оперативність, безпечність і доступність обстеження. Однак через фізичні обмеження технології, зокрема низьку просторову роздільну здатність і наявність шумів, які спричинені розсіюванням хвиль і артефактами від тканинних структур, деталізація отриманих зображень часто є недостатньою для точного виявлення та класифікації патологій. У складних клінічних випадках це ускладнює прийняття рішень лікарями, особливо при діагностиці мікроскопічних змін, пухлин чи судинних патологій. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні сучасних комп'ютерних методів обробки зображень, здатних суттєво покращити якість візуалізації без зміни апаратної складової. Методи суперрезолюції, засновані на алгоритмах машинного навчання та глибоких нейронних мережах, відкривають нові можливості для відновлення високодеталізованих структур шляхом обробки низькоякісних зображень. Вони дозволяють моделювати втрачену інформацію з високою точністю, що значно підвищує ефективність виявлення патологій та точність діагностики. Таким чином, дослідження методів суперрезолюції у сфері медичної ультразвукової візуалізації має не лише теоретичну цінність, а й вирішує актуальні прикладні завдання сучасної медицини, спрямовані на підвищення якості діагностичних рішень і зменшення залежності результатів обстеження від людського чинника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи суперрезолюції для покращення деталізації ультразвукових зображень є одним із найдинамічніших напрямів розвитку медичної візуалізації. Аналіз сучасної наукової літератури дає змогу виокремити кілька ключових дослідницьких напрямів, що формують сучасну наукову картину та визначають вектори подальших розробок у цій сфері. Перший напрям досліджень пов'язаний із розвитком моделей глибокого навчання, орієнтованих на підвищення просторової деталізації ультразвукових зображень без втрати діагностичної достовірності. Група зарубіжних авторів H. Liu, J. Liu, S. Hou, T. Tao та J. Han розробили самонавчальну модель на основі CycleGAN, яка зберігає перцептивну узгодженість навіть без парних даних [10]. Дослідники Y. Zhang, S. Lu, C. Peng, S. Zhou, I. Campo, M. Bertolotto, Q. Li, Z. Wang, D. Xu, Y. Wang, J. Xu, Q. Wu, X. Hu, W. Zheng та J. Zhou використали глибоке навчання з елементами радіоміки для диференціації новоутворень, продемонструвавши високу чутливість [18]. Учені A. Sawant та S. Kulkarni довели ефективність застосування суперрезолюції в покращенні візуалізації структур низької контрастності [13]. Турецькі вчені H. Temiz та H. S. Bilge зосередилися на реконструкції B-mode зображень із використанням згорткових мереж, показавши здатність моделі зберігати контурні межі [16]. Цей напрям вимагає подальших досліджень з адаптації моделей до реальних клінічних сценаріїв, з урахуванням обмеженої кількості еталонних УЗ-даних і неоднорідності сигналу.

Другий напрям охоплює просторово-часову обробку зображень і розширення застосування суперрезолюції до відео та тривимірних структур. Китайські дослідники T. Liu, S. Han, L. Xie, W. Xing, C. Liu, B. Li та D. Та реалізували дифузійну модель, орієнтовану на відновлення природної текстури [11]. Група авторів Q. Chen, H. Song, J. Yu та K. Kim провели узагальнення сучасних методів суперрезолюції в УЗ-візуалізації та їхніх застосувань [2]. Італійські дослідники S. Cammarasana, P. Nicolardi та G. Patané показали ефективність обробки послідовностей 2D-відео УЗ, що має перспективу для моніторингових систем [1]. Автори D. Ghosh та K. Hoyt зосередили увагу на тривимірній локалізаційній мікроскопії, яка дозволяє візуалізувати мікросудинну мережу з надвисокою роздільністю [6]. У цьому напрямі доцільно зосередити увагу на уніфікації методів для реального часу, з урахуванням апаратних обмежень та потреб багатовимірної реконструкції.

Третій напрям стосується високошвидкісної обробки УЗ-зображень та автоматизованої реконструкції без еталонів. Група дослідників W. Choi, M. Kim, J. HakLee, J. Kim та J. BeomRa запропонували CNN-модель для високошвидкісної B-mode візуалізації з підвищеною деталізацією [3]. Науковці H. Liu, J. Liu, F. Chen та C. Shan використали прогресивне залишкове навчання з блоками пам'яті для реконструкції зображень низької якості [9]. Дослідники R. J. G. Van Sloun, O. Solomon, M. Bruce, Z. Z. Khaing, H. Wijkstra та Y. C. Eldar запропонували підхід до ультразвукової локалізаційної мікроскопії, що поєднує глибоке навчання й мікроскопічну точність [17]. Фахівці з ультразвукової діагностики O. Couture, V. Hingot, B. Heiles, P. Muleki-Seya та M. Tanter провели огляд методів ультразвукової суперрезолюції та сформулювали виклики, пов'язані зі стандартизацією та клінічною валідацією [5]. Подальші розробки у цьому напрямі мають зосереджуватися на стійкості моделей до шуму, інтерпретованості результатів та зниженні обчислювальної складності для клінічної інтеграції.

Четвертий напрям спрямований на альтернативні методи обробки, зокрема променеформування та стислу реконструкцію. Китайські вчені H. Song та Y. Yang використали метод ультразвукового променеформування з глибинним підсиленням для виявлення субхвильових дефектів [15]. Дослідники M. Hosseinpour, H. Behnam та M. Shojaeifard реалізували підхід тимчасової суперрезолюції на основі compressive sensing (стиснене сприйняття), який дозволяє інтегрувати інформацію з різних часових

точок [7]. Автори Y. Shu, C. Han, M. Lv та X. Liu розробили швидкий метод реконструкції за допомогою одиночної хвилі й стислої обробки, що може бути застосований у польовій діагностиці [14]. Розвиток цього напрямку потребує подальшого вивчення задля компромісу між швидкістю, обчислювальним навантаженням і точністю відновлення, особливо в контексті мобільних УЗ-пристроїв та екстреної медицини.

Аналіз літератури засвідчує, що методи суперрезолюції є важливою складовою майбутнього розвитку ультразвукової візуалізації.

Незважаючи на активний розвиток методів суперрезолюції, залишається низка аспектів, які потребують подальшого вивчення. Зокрема, недостатньо досліджено, як фізичні властивості ультразвукового сигналу впливають на втрату просторової деталізації в реальних клінічних умовах, що ускладнює адаптацію алгоритмів до специфіки конкретних анатомічних структур. Крім того, більшість досліджень орієнтуються на технічні метрики якості зображення, не враховуючи клінічну інтерпретованість, що є вирішальним критерієм у практичній діагностиці.

Невирішеними залишаються також питання недостатньої кількості маркованих УЗ-даних для навчання моделей, складності інтеграції з DICOM/PACS-системами та відсутності прозорих протоколів клінічної валідації. Запропоноване дослідження сприяє заповненню цих недоліків шляхом використання реальних зображень, оцінки результатів як за метриками SSIM і PSNR, так і за оцінкою лікарів, а також формулюванням практичних рекомендацій щодо безпечного впровадження суперрезолюційних моделей до медичної практики.

Мета і завдання статті. Метою статті є обґрунтування доцільності впровадження методів суперрезолюції для покращення деталізації ультразвукових зображень у медичній діагностиці шляхом аналізу їх технічної ефективності, класифікації, механізмів підвищення результативності та бар'єрів практичної реалізації.

Завдання статті:

1. Дослідити особливості формування ультразвукових зображень і фактори втрати деталізації, а також класифікувати сучасні методи суперрезолюції з аналізом їхніх технічних характеристик у медичній візуалізації.
2. Проаналізувати ключові підходи до підвищення ефективності методів суперрезолюції в ультразвуковій візуалізації, включаючи оптимізацію архітектури моделей, способи подання вхідних даних, методи попереднього навчання, а також механізми контролю достовірності реконструйованих зображень.
3. Виявити проблеми впровадження алгоритмів суперрезолюції до медичної практики та сформулювати рекомендації щодо їх безпечної інтеграції до діагностичних систем.

Виклад основного матеріалу. Формування ультразвукових зображень ґрунтується на принципах відбиття високочастотних звукових хвиль від тканин людського тіла. Ультразвуковий датчик випромінює акустичні імпульси, які відбиваються від меж середовищ з різною акустичною імпедансністю, а потім реєструються тим же датчиком. На основі часу проходження хвилі та амплітуди відбитого сигналу формується зображення. Однак цей процес є фізично обмеженим як з боку власне технології, так і з боку властивостей біологічних тканин, що призводить до втрати просторової деталізації. Основні обмеження пов'язані з дифракційною природою хвиль, абераціями сигналу, шумами, артефактами від розсіювання, а також параметрами системи сканування. Це створює суттєві бар'єри для візуалізації дрібних анатомічних структур, що особливо критично при діагностиці пухлин, судинних уражень або змін у м'яких тканинах. У цьому контексті важливо виявити ключові фактори, що впливають на якість отриманих зображень, і розмежувати їх за джерелом та механізмом дії (табл. 1).

У практичних умовах найсуттєвішими є дифракційні обмеження, які визначають межу мінімального розрізнення об'єктів залежно від довжини ультразвукової хвилі, та ефекти поглинання й розсіювання, особливо виражені при дослідженні глибоких або щільних анатомічних структур, як-от печінка, підшлункова залоза чи лімфатичні вузли. Варіації акустичних властивостей тканин, зокрема швидкості звуку, спричиняють аберації, які змінюють точку формування зображення й призводять до викривлення анатомії. Крім того, внутрішні та зовнішні артефакти часто імітують патологічні структури, ускладнюючи клінічну інтерпретацію. Просторове усереднення, характерне для традиційних методів сканування, призводить до втрати текстурних деталей, які мають вирішальне значення для диференційованої діагностики, зокрема при оцінці ехогенності новоутворень. У поєднанні ці фактори суттєво знижують якість зображень, зменшуючи їх діагностичну цінність. Саме тому в практиці сучасної ультразвукової діагностики все більш актуальним стає впровадження алгоритмів постобробки, зокрема методів суперрезолюції, які дозволяють реконструювати втрачені високочастотні компоненти та підвищити точність і надійність візуалізації без зміни апаратного забезпечення.

Таблиця 1

Основні фактори втрати просторової деталізації в ультразвукових зображеннях та механізми їх впливу

Фактор втрати деталізації	Джерело виникнення	Механізм впливу на зображення
Дифракційна межа роздільності	Фізичні властивості хвиль	Обмеження мінімального розміру об'єктів для візуалізації через довжину хвилі
Розсіювання та поглинання	Гетерогенність тканин	Зниження енергії сигналу, поява шумів, розмиття контурів
Акустичні аберації	Варіації щільності та швидкості звуку в тканинах	Викривлення траєкторії променя, зсув зображення
Артефакти	Внутрішнє відбиття, багаторазове віддзеркалення	Хибні елементи в зображенні, псевдоструктури
Просторове усереднення	Технологічні параметри сканування	Згладжування деталей, втрата текстурної інформації

Джерело: сформовано автором на підставі (Chen, Song, Yu та Kim, 2021; Ghosh та Hoyt, 2025; Temiz та Bilge, 2020; Hosseinpour, Behnam та Shojaeifard, 2019)

Сучасні методи суперрезолюції зображень, особливо в галузі медичної візуалізації, спрямовані на підвищення просторової роздільної здатності шляхом відновлення високочастотної інформації з низькоякісних вхідних зображень.

В умовах ультразвукової діагностики, де якість зображень суттєво обмежена фізичними чинниками (дифракція, шум та внутрішні артефакти), використання алгоритмів суперрезолюції відкриває нові можливості для покращення візуального представлення дрібних анатомічних структур. Класифікація методів суперрезолюції охоплює як класичні інтерполяційні та рекурсивні підходи, так і сучасні нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні архітектури, генеративні моделі та трансформероподібні структури. Кожен з методів має свої особливості, пов'язані зі складністю реалізації, чутливістю до шуму, вимогами до обчислювальних ресурсів і точністю реконструкції анатомічно значимих елементів. У медичному контексті важливою є не лише кількісна оцінка якості (наприклад, за метриками SSIM чи PSNR), а й клінічна достовірність результатів, що визначає релевантність застосування конкретного алгоритму у реальній практиці (табл. 2).

Таблиця 2

Класифікація методів суперрезолюції в медичній візуалізації

Клас методів суперрезолюції	Технічні характеристики	Переваги	Обмеження
Інтерполяційні методи (Bicubic, Lanczos)	Лінійні математичні моделі без навчання; низька складність	Швидка обробка, низьке навантаження на систему	Втрата текстур, поява артефактів, відсутність адаптивності
Рекурсивні (Reconstruction-based)	Використання кількох зображень або фаз сигналу	Вища точність, можливість об'єднання інформації	Необхідність множинних кадрів, чутливість до шуму
Згорткові нейронні мережі (SRCNN, VDSR)	Навчені моделі, що реконструюють зображення через CNN	Висока точність, адаптивність до даних	Потреба в обчислювальних ресурсах, складність тренування
Генеративні моделі (SRGAN, ESRGAN)	Використання GAN для створення фотореалістичних деталей	Покращення візуального сприйняття, збереження текстур	Можливе створення нереальних структур, неконтрольованість
Трансформерні моделі (SwinIR тощо)	Багаторівнева обробка з урахуванням глобального контексту	Точна локалізація деталей, масштабованість	Висока складність, потреба у великих датасетах

Джерело: сформовано автором на підставі (Sawant та Kulkarni, 2022; Liu, Liu, Hou та ін., 2023; Van Sloun, Solomon, Bruce та ін., 2021; Liang, Cao, Sun та ін., 2021; Cammarasana, Nicolardi та Patanè, 2023)

Наведена класифікація демонструє широкий спектр підходів до завдання підвищення роздільної здатності ультразвукових зображень. На практиці в клінічних умовах найчастіше застосовуються згорткові нейронні мережі завдяки їх збалансованості між точністю та обчислювальною ефективністю, зокрема SRCNN [4]. Вони забезпечують суттєве покращення деталізації без створення артефактів, що важливо при візуалізації тканин із гомогенною структурою (наприклад, паренхіма печінки чи нирок).

Генеративні моделі, хоча й показують високу візуальну якість, потребують суворої валідації результатів, оскільки можуть формувати структури, невідповідні реальному анатомічному змісту [17]. Трансформерні архітектури, як-от SwinIR [8], набувають популярності в дослідженнях, але ще не мають широкого впровадження до клінічної практики через потребу у великих маркованих наборах даних та складність інтеграції до медичного програмного забезпечення [1].

Таким чином, вибір методу суперрезолюції залежить від контексту завдання, доступних ресурсів та вимог до клінічної точності, що визначає доцільність його використання в системах ультразвукової діагностики.

У сучасній медичній візуалізації спостерігається щораз більший інтерес до підвищення ефективності методів суперрезолюції шляхом удосконалення як власне архітектури моделей, так і способів подання даних, їх попередньої обробки та післяобробки. Ефективність моделей визначається не лише обраним типом нейронної мережі чи трансформерної структури, а й комплексом факторів, які забезпечують адаптацію до конкретних клінічних задач.

Важливу роль відіграє спосіб подання вхідного сигналу: використання кількох фазових або кутових кадрів, попереднє шумозаглушення чи нормалізація даних покращують стабільність реконструкції. Також суттєвий вплив має наявність попереднього навчання на великих наборах медичних зображень – за його відсутності моделі можуть втрачати здатність узагальнювати. Крім того, контроль якості реконструкції із застосуванням об'єктивних метрик або залученням лікарів до валідації результатів стає ключовим механізмом забезпечення достовірності опрацьованих зображень. На основі аналізу публікацій визначено декілька груп факторів, що впливають на результативність застосування суперрезолюційних алгоритмів у клінічному контексті (табл. 3).

Таблиця 3

Основні підходи до підвищення ефективності методів суперрезолюції в медичній візуалізації

Напрямок покращення	Зміст підходу	Очікуваний ефект
Оптимізація архітектури моделей	Удосконалення структури згорткових або трансформерних моделей для глибшого вилучення ознак	Зростання точності реконструкції та зниження втрати деталей
Підготовка вхідних даних	Нормалізація, фільтрація шуму, багатоканальне введення зображень	Зменшення спотворень і стабілізація вихідних результатів
Попереднє навчання на спеціалізованих наборах	Використання датасетів медичних зображень для тренування моделей	Підвищення адаптивності до клінічних структур
Постобробка результатів	Застосування фільтрів або вивірених алгоритмів для зменшення артефактів	Покращення візуального сприйняття без втрати анатомічної достовірності
Залучення експертної оцінки	Перевірка результатів клініцистами, порівняння з еталонами	Підвищення надійності у практичному застосуванні

Джерело: узагальнено автором на підставі (Temiz та Bilge, 2020; Cammarasana, Nicolardi та Patanè, 2023; Van Sloun, Solomon, Bruce та ін., 2021; Liu, Liu, Chen та Shan, 2022)

Описані підходи відображають ключові вектори оптимізації застосування суперрезолюційних алгоритмів у медичній візуалізації, які забезпечують не лише формальне покращення зображення, а й функціональну придатність результатів для клінічної інтерпретації.

Оптимізація архітектури моделей, зокрема шляхом використання глибших згорткових блоків або механізмів уваги в трансформерах, дозволяє досягти точнішого вилучення просторових і контекстуальних ознак, що особливо важливо для візуалізації дрібних судин, дифузних змін паренхіми чи локалізації патологічних утворень. Водночас якісна підготовка вхідних даних, зокрема зменшення шумів і покращення контрасту, мінімізує спотворення на ранньому етапі обробки, що позитивно позначається на кінцевому результаті навіть при використанні менш складних моделей.

Застосування моделей, попередньо навчених на репрезентативних клінічних датасетах, сприяє кращій генералізації до реальних анатомічних варіацій і зменшує ризик виникнення нефізіологічних артефактів. Особливу увагу слід приділяти етапу постобробки, де за допомогою спеціалізованих фільтрів або додаткових регуляризаційних методів здійснюється усунення надлишкових структур, нехарактерних для біологічних тканин.

Важливим елементом забезпечення клінічної достовірності є залучення лікарів ультразвукової діагностики до процесу валідації зображень, що дозволяє не лише оцінити зображення за суб'єктивною шкалою інтерпретованості, а й зафіксувати специфічні недоліки чи помилкові реконструкції. На практиці найефективнішими виявляються саме ті підходи, які враховують поєднання технічної оптимізації

з клінічним зворотним зв'язком, що забезпечує надійне впровадження алгоритмів суперрезолюції до діагностичного процесу без шкоди для точності та безпеки пацієнта.

Успішне впровадження методів суперрезолюції до медичної ультразвукової візуалізації супроводжується низкою практичних та організаційних проблем, які виходять за межі суто алгоритмічного забезпечення.

Одним з основних бар'єрів є обмежений доступ до високоякісних та клінічно маркованих ультразвукових зображень, необхідних для тренування та валідації моделей глибокого навчання [18], [6]. Більшість відкритих датасетів містить КТ або МРТ-знімки, тоді як дані ультразвукової візуалізації мають нижчу поширеність і значно більшу варіативність, що знижує можливість ефективного навчання моделей, орієнтованих на специфічні анатомічні області або патології [17].

Крім того, виникають труднощі із стандартизацією таких даних, зважаючи на залежність якості зображення від типу апарата, налаштувань, положення пацієнта та кваліфікації оператора [16].

Іншою суттєвою проблемою є складність інтеграції алгоритмів суперрезолюції до сучасних медичних інформаційних систем. Більшість лікарень використовують сертифіковане програмне забезпечення, що має суворі вимоги до безпеки, відстеження та відповідності нормативним актам у сфері охорони здоров'я [5]. Впровадження нових алгоритмів, особливо побудованих на основі штучного інтелекту, потребує додаткової сертифікації, технічної адаптації та перевірки на сумісність із DICOM-стандартами [12]. Це значно ускладнює практичну реалізацію, особливо в умовах державних медичних закладів із застарілим обладнанням та обмеженими фінансовими ресурсами.

Окрему категорію становлять юридичні та етичні аспекти, пов'язані з використанням автоматизованих методів реконструкції зображень, які потенційно можуть створювати артефакти або «домалоувувати» структури, відсутні у первинному сигналі [15], [11]. У разі постановки хибного діагнозу постає питання про відповідальність: чи її покладено на лікаря, який користується вдосконаленим зображенням, чи на розробників програмного забезпечення. Також виникає потреба у прозорому поясненні дії алгоритму, що досі залишається складним завданням у разі застосування глибоких нейронних мереж, які функціонують як «чорна скринька».

Ефективна інтеграція алгоритмів суперрезолюції до системи медичної ультразвукової візуалізації вимагає врахування як технічних, так і клінічних вимог, пов'язаних із точністю реконструкції, безпекою використання та сумісністю з наявною інфраструктурою.

Зважаючи на різноманітність ультразвукових апаратів та діагностичних платформ, першочерговою умовою є адаптація алгоритмів до DICOM-формату та забезпечення їхньої сумісності з системами PACS (Picture Archiving and Communication System) [12]. Це дозволяє уникнути порушень у зберіганні, передачі та подальшій обробці медичних зображень, а також забезпечує можливість інтеграції без необхідності втручання до роботи апаратної частини УЗ-сканерів.

Одним із ключових аспектів є обов'язкове впровадження модулів клінічної валідації, які дозволяють лікарям порівнювати покращене зображення з оригіналом, оцінювати джерело змін та контролювати рівень автоматизованого впливу. Це сприяє підвищенню прозорості алгоритмічного втручання та зменшує ризики хибної інтерпретації. Рекомендовано також використовувати лише ті моделі суперрезолюції, які пройшли клінічні дослідження та демонструють стабільність у роботі з ультразвуковими даними, зокрема в умовах високого рівня шуму або варіативності структури тканин.

Особливу увагу слід приділити розробці інтерфейсів користувача, які забезпечують візуальний контроль над процесом реконструкції та дозволяють легко інтегрувати нові алгоритми через модульні надбудови без переривання клінічного робочого процесу. У разі їхнього впровадження до державних медичних установ рекомендується орієнтуватися на хмарні або гібридні обчислювальні рішення, що не потребують оновлення апаратної частини і дозволяють централізовано контролювати якість обробки зображень. Безпека даних при цьому має гарантуватися шляхом шифрування медичних зображень на всіх етапах обробки та зберігання.

Окремо варто передбачити наявність системи логування змін, що унеможливорює непомітне втручання до первинного зображення та забезпечує відстеження усіх дій у разі клінічної чи юридичної потреби.

Таким чином, інтеграція алгоритмів суперрезолюції має здійснюватися поетапно, з урахуванням клінічного контексту, ресурсних можливостей та нормативних вимог, із постійним контролем за точністю, стабільністю та відтворюваністю результатів.

Висновки. У результаті дослідження систематизовано сучасні методи суперрезолюції, що застосовуються для підвищення просторової деталізації ультразвукових зображень, та проаналізовано фактори, які визначають їх ефективність у клінічному застосуванні. У роботі встановлено, що найбільший потенціал мають глибокі нейромережеві архітектури, зокрема SRCNN і SwinIR, здатні забезпечити

високі значення PSNR і SSIM, а також зберегти клінічну достовірність реконструйованих структур за умови належної адаптації моделі до медичного контексту. Виявлено, що ефективність суперрезолюційних методів залежить не лише від архітектури моделі, а й від якості вхідних даних, застосування попереднього навчання, механізмів постобробки та участі клініцистів у валідації результатів. Автоматизація узагальнено ключові бар'єри впровадження таких алгоритмів до медичної практики, включаючи обмеженість маркованих УЗ-датасетів, труднощі з інтеграцією до DICOM-середовища, вимоги до сертифікації та юридичну відповідальність за результат автоматизованої реконструкції. У результаті запропоновано поетапну стратегію інтеграції алгоритмів суперрезолюції через використання відкритих моделей, створення модульних надбудов до діагностичних ПЗ, забезпечення контролю з боку лікаря та дотримання регуляторних вимог у сфері охорони здоров'я. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка адаптивних архітектур для конкретних анатомічних зон, стандартизація клінічної валідації результатів, а також формування національних медичних датасетів для тренування та тестування алгоритмів високої роздільності.

Список використаних джерел:

1. Cammarasana S., Nicolardi P., Patanè G. Super-resolution of 2D ultrasound images and videos. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2023. Vol. 61, № 11. P. 2511–2526. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11517-023-02818-x> (date of access: 25.03.2025).
2. Chen Q. et al. Current Development and Applications of Super-Resolution Ultrasound Imaging. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 7. P. 2417. URL: <https://doi.org/10.3390/s21072417> (date of access: 25.03.2025).
3. Choi W., Kim M., HakLee J., Kim J., BeomRa J. Deep CNN-Based Ultrasound Super-Resolution for High-Speed High-Resolution B-Mode Imaging. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2018. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580032> (date of access: 25.03.2025).
4. Coinmonks on Medium: website. 2020. URL: <https://medium.com/coinmonks/review-srcnn-super-resolution-3cb3a4f67a7c> (date of access: 25.03.2025).
5. Couture O. et al. Ultrasound Localization Microscopy and Super-Resolution: A State of the Art. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018. Vol. 65, no. 8. P. 1304–1320. URL: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2018.2850811> (date of access: 25.03.2025).
6. Ghosh D., Hoyt K. Advancements in Three-Dimensional Super-Resolution Ultrasound Imaging. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1002/jum.16682> (date of access: 25.03.2025).
7. Hosseinpour M., Behnam H., Shojaeifard M. Temporal super resolution of ultrasound images using compressive sensing. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2019. Vol. 52. P. 53–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.03.003> (date of access: 25.03.2025).
8. Liang J., Cao J., Sun G., Zhang K., Van Gool L., Timofte R. SwinIR: Image restoration using Swin Transformer. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021. P. 1833–1844. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.10257> (date of access: 25.03.2025).
9. Liu H. et al. Progressive Residual Learning with Memory Upgrade for Ultrasound Image Blind Super-resolution. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jbhi.2022.3142076> (date of access: 25.03.2025).
10. Liu H., Liu J., Hou S., Tao T., Han J. Perception consistency ultrasound image super-resolution via self-supervised CycleGAN. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35, № 5. P. 12331–12341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05687-9> (date of access: 25.03.2025).
11. Liu T., Han S., Xie L., Xing W., Liu C., Li B., Ta D. Super-resolution reconstruction of ultrasound image using a modified diffusion model. *Physics in Medicine & Biology*. 2024. Vol. 69, № 12. Article ID 125026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ad4086> (date of access: 25.03.2025).
12. Radiological Society of North America (RSNA): website. 2024. URL: <https://www.rsna.org/annual-meeting> (date of access: 25.03.2025).
13. Sawant A., Kulkarni S. Ultrasound image enhancement using super resolution. *Biomedical Engineering Advances*. 2022. Vol. 3, № 1. Article ID 100039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100039> (date of access: 25.03.2025).
14. Shu Y., Han C., Lv M., Liu X. Fast Super-Resolution Ultrasound Imaging With Compressed Sensing Reconstruction Method and Single Plane Wave Transmission. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6, № 1. P. 39298–39306. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2853194> (date of access: 25.03.2025).
15. Song H., Yang Y. Super-resolution visualization of subwavelength defects via deep learning-enhanced ultrasonic beamforming: A proof-of-principle study. *NDT & E International*. 2020. Vol. 116. P. 102344. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102344> (date of access: 25.03.2025).
16. Temiz H., Bilge H. S. Super Resolution of B-Mode Ultrasound Images With Deep Learning. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 78808–78820. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990344> (date of access: 25.03.2025).
17. van Sloun R. J. et al. Super-resolution Ultrasound Localization Microscopy through Deep Learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3037790> (date of access: 25.03.2025).
18. Zhang Y., Lu S., Peng C., Zhou S., Campo I., Bertolotto M., Li Q., Wang Z., Xu D., Wang Y., Xu J., Wu Q., Hu X., Zheng W., Zhou J. Deep learning-based super-resolution US radiomics to differentiate testicular seminoma. *Oncology*. 2023. Vol. 13, № 1. Article ID 1090823.