

УДК 616-073

[https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-8\(54\)-2166-2176](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-8(54)-2166-2176)

**Закревський Андрій Миколайович** кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри педіатрії 3 та неонатології, Харківський Національний Медичний Університет, <https://orcid.org/0000-0001-6986-9351>

**Закревський Кирило Андрійович** лікар-рентгенолог, КНП «Міська клінічна лікарня швидкої та невідкладної медичної допомоги ім. проф. О.І. Мещанінова» ХМР, <https://orcid.org/0009-0007-9175-9256>

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ У РАДІОЛОГІЇ: ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

**Анотація.** В роботі висвітлюється актуальне питання сучасної радіології щодо інноваційних технологічних можливостей для розширення можливостей візуалізації та отримання високоточних зображень органів та тканин. Використання цифрових технологій та штучного інтелекту відкриває нові можливості для покращення якості візуалізацій, підвищення точності діагнозу, раннього виявлення патології та зменшення часу обробки зображень.

Метою роботи було проведення аналізу сучасних методів візуалізації у радіології та визначити переваги застосування цифрових технологій та штучного інтелекту.

Під час проведення аналізу літературних даних було визначено основні переваги та можливості медичної діагностики з інтеграцією ШІ. А саме, покращення якості зображення, збільшення швидкості обробка отриманих даних. Крім того, серед позитивних змін виділяються обробка зображень у реальному часі, автоматизація процесу сегментації, виявлення патологічних змін та зменшення рівня опромінення.

Науковці зазначають, завдяки машинному навчанню можливо добитися позитивних ефектів для всього процесу радіологічної візуалізації, як отримання зображень, так і оптимізація процесів. Алгоритми штучного інтелекту покращують реконструкції зображення, що приводить до більш високої якості, зменшенню часу вимірювання. Це має велике значення для раннього виявлення патологічних станів, встановлення рідкісних захворювань та відстеження динаміки змін, а також допомогти лікарям у виборі індивідуального плану лікування.

Отже, завдяки розвитку та інтеграції штучного інтелекту можливо підвищити якість рентгенологічної діагностики, а також, швидкість процесу та оптимізувати тактики лікування. Такий підхід сприятиме розробці персоналізованих підходів шляхом аналізу даних системи електронної охорони здоров'я для прийняття рішень щодо кожного окремого пацієнта.

**Ключові слова:** медицина, діагностика, штучний інтелект, ефективність, візуалізація.

**Zakrevskyy Andriy Mykolayovych** Candidate of Medical Sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Pediatrics No3 and Neonatology, Kharkiv National Medical University, <https://orcid.org/0000-0001-6986-9351>

**Zakrevskyy Kyrylo Andriyovych** Radiologist, Municipal Non-Profit Enterprise "City Clinical Hospital for Emergency Medical Services named after Prof. O.I. Meschaninov" of Kharkiv City Council, <https://orcid.org/0009-0007-9175-9256>

## **MODERN VISUALIZATION METHODS IN RADIOLOGY: DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

**Abstract.** The paper highlights the topical issue of modern radiology regarding innovative technological capabilities to enhance the visualization capabilities and obtain high-precision images of organs and tissues. The use of digital technologies and artificial intelligence opens up new opportunities for improving the quality of visualization, increasing the accuracy of diagnosis, early detection of pathology and reducing image processing time.

The purpose of the study was to analyze modern imaging methods in radiology and to determine the benefits of using digital technologies and artificial intelligence.

The paper looked at the main ways digital tech is used in X-ray imaging and figured out the main possibilities for this kind of integration. The main advantages were the ability to improve image quality and speed up data processing. In addition, positive changes include real-time image processing, automation of the segmentation process, detection of pathological changes, and reduction of radiation exposure.

Scientific research has determined that machine learning can have positive effects on the entire radiological imaging process, including image acquisition and process optimization. Artificial intelligence algorithms improve image reconstruction, resulting in higher quality and reduced measurement time. This is of great importance for the early detection of pathological conditions, the identification of rare diseases, and the monitoring of changes, as well as helping doctors to choose an individual treatment plan.

Thus, thanks to the development and integration of artificial intelligence, it is possible to improve the quality of radiological diagnostics, as well as the speed of the process and the optimization of treatment tactics. This approach will facilitate the development of personalized approaches by analyzing electronic health system data to make decisions about each individual patient.

**Keywords:** radiology, diagnostics, artificial intelligence, efficiency, visualization.

**Постановка проблеми.** Сучасний стрімкий розвиток цифрових технологій сприяє інтеграції штучного інтелекту (ШІ) в різних медичних галузях. При цьому діагностична сфера найбільш активно використовує машинне навчання для покращення якості медичної допомоги [1, 2, 3].

Наразі розробляються багато програм на основі ШІ, які можуть впливати на всі етапи процесу візуалізації, починаючи від замовлення тестів і закінчуючи передачею звітів.

Було встановлено що завдяки технологіям ШІ можливо допомогти у виборі лікування пацієнтів, покращити якість зображень та інтерпретацію діагностичних даних. ШІ в наш час широко застосовується в комп'ютерній томографії (КТ), ультразвукових дослідженнях (УЗД), рентгенографії, флюороскопія та магнітно-резонансна томографія (МРТ) [4, 5, 6, 7]. З розвитком технологій медичної візуалізації та використанням великих наборів даних штучний інтелект допомагає виявляти ознаки, які неможливо помітити людським оком [1].

Інтеграція цифрових технологій та штучного інтелекту може допомогти аналізувати великі обсяги медичних даних, виявляти складні захворювання та ознаки не видимі людським оком, автоматизувати рентгенологічну обробку та супроводжувати лікаря під час прийняття рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки в радіології настає нова ера активного використання ШІ, яка зосереджена на аналізі зображень. Все більше наукових досліджень присвячені питанню розвитку та застосування машинного навчання в медичну практику. Так, у своїх роботах R. Ahmad, L. Escudero Sanchez, J. H. Thrall, R. Singh, R. Heckel вивчають результати інтеграції цифрових технологій та ШІ в різні радіологічні методи. Дослідження O. Бойченко, T. Бублій, K. Jun, S. Gampala, S. Wang, N. Kapoor, C. A. Stueckle, L. Gallée були зосереджені на оцінці клінічної значущості використання моделей машинного навчання для класифікації захворювань або прогнозуванні.

**Мета роботи** – провести аналіз сучасних методів візуалізації у радіології та визначити переваги застосування цифрових технологій та штучного інтелекту.

**Виклад основного матеріалу.** В наш час медична візуалізація активно використовується для виявлення та моніторингу різних захворювань. Інтеграція цифрових технологій сприяє розвитку можливостей рентгенології та підвищенню якості медичних послуг. ШІ здатний виконувати складні завдання ефективніше та швидше, ніж людина, при цьому, не втрачаючи продуктивності [1, 4].

Алгоритми ШІ дозволяють ефективно обробляти великі обсяги даних та вирішувати різні питання. На початковому етапі навчання вже відомі або раніше приховані зв'язки у вибіркових даних виявляються та представляють у моделі. За допомогою моделей ШІ, навчених таким чином, виявлені кореляції можна безпосередньо застосовувати до нових даних, щоб їх можна було швидко та легко обробляти. Завдяки високому ступеню цифровізації та відкритості до технічного прогресу, цей підхід виявився дуже потужним інструментом для ефективної обробки постійно зростаючої кількості даних зображень особливо в

радіології [8]. Розробки як у візуалізації, так і в технічних можливостях синергетично сприяли швидкому зростанню очікуваного використання ШІ в різних завданнях радіологічної візуалізації, таких як оцінка ризику, ідентифікація, діагностика, прогноз, відповідь на терапію та ризик рецидиву, а також у виявленні мультиомних захворювань [3].

Протягом свого розвитку рентгенологія зазнала значного технологічного прогресу, починаючи з двовимірної проєкційної рентгенографії та переходячи до три- та чотиривимірної, високороздільної, сучасної візуалізації з поперечними перерізами. Найбільш часто в радіологічних методах візуалізації ШІ використовується в МРТ (37% систем ШІ використовують набори даних МРТ), далі йде КТ-візуалізація (29%), причому найпоширенішим завданням є сегментація (39%) [9]. Серед усіх технологій візуалізації КТ відіграє дедалі важливішу роль у скринінгу, діагностиці та спостереженні за різноманітними клінічними станами та є методом вибору при травмах, інфекційних та онкологічних захворюваннях [10].

Ще одним методом медичної візуалізації є МРТ, який має здатність візуалізувати внутрішні структури та функції людського тіла, від виявлення ледь помітних патологічних змін до спрямування терапевтичних втручань. Не дивлячись на діагностичні можливості МРТ, які зараз використовуються, залишається ще обмеження щодо часу проведення дослідження та якості результатів. Саме високоякісні зображення є необхідними для постановки точного діагнозу та вимагають тривалий процес діагностики, що може бути незручним для пацієнта та збільшувати ризик похибок, які спричинені рухом. Всі ці труднощі підкреслюють необхідність розробки швидших методів МРТ, які залишатимуть якість зображень на даних рівні, але зменшать час їх отримання [11].

Машинне навчання, що характеризується алгоритмами на основі обчислювальних нейронних мереж, досягла значного успіху у вилученні складних шаблонів з великих наборів даних. У сфері реконструкції МРТ-зображень методи ШІ зосереджені на навчанні з величезних обсягів даних для перетворення недостатньо дискретизованих або зашумлених даних у високоточні зображення. Ці методи продемонстрували свою здатність пом'якшувати артефакти, покращувати роздільну здатність та пришвидшувати процес візуалізації [12, 13].

Радіологія є платформою для багатьох технологічних досягнень у медичній галузі, ШІ може впливати на кожен етап робочого процесу рентгенолога. ШІ може спростити будь-яку діяльність, таку як замовлення та планування, протоколювання та отримання даних, інтерпретація зображень, звітність, комунікація (табл. 1).

Таблиця 1

### Основні напрямки та результати інтеграції ШІ в рентгенології

Процес	Результат
Попереднє опрацювання рентгенологічних зображень	Підвищення якості, поліпшення сегментації та формування зображень
Сегментація та виявлення патологій	Автоматичне визначення та виділення області патології, наприклад, пухлини, запальні процеси, що покращує точність і швидкість діагностики
Аналіз та інтерпретація медичних зображень	Виявлення, класифікація, точна локалізація та формування характеристик аномалій, патологій
Прийняття рішень	Інтелектуальні системи можуть порівнювати знімки з великими базами даних, що допомагає при постановці діагнозу, складанні прогнозів, ризиків і курсу лікування на основі медичних зображень та інших клінічних даних
Рівень опромінення	ШІ дозволяє зменшувати дозу опромінення для пацієнта, оскільки високоякісні знімки можна отримати при менших дозах, завдяки покращенню процесу обробки сигналу
Робочий процес	Автоматизація та оптимізація робочих процесів та ресурсів допомагає в плануванні, розподілу, пріоритизації, архівації та передачі медичних зображень та пов'язаних з ними даних

Низка алгоритмів машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, була впроваджена в системах пошуку зображень на основі контенту для підвищення ефективності та точності запитів. Обробка текстових звітів з радіології є ще одним застосуванням машинного навчання в радіології. Великі текстові бази даних складаються з накопичених звітів щоденної радіологічної практики. Сучасні технології обробки інформації використовуються для цих баз даних радіологічних звітів з метою покращення пошуку звітів та допомоги радіологам у постановці точних діагнозів. Розуміння природної мови обробка сприяють більш ефективному підходу до управління та отримання відповідної інформації з радіологічних звітів [1]. Крім того, методи ШІ дозволяють швидше та краще діагностувати, наприклад, завдяки автоматичному анутованню органів та патологій та новим кількісним та візуальним маркерам, які зараз активно досліджуються [7, 8].

Обчислювальні методи відіграють ключову роль як у реконструкції зображень, так і в аналізі зображень. Реконструкція зображень стосується теорії та алгоритмів для обчислювального відновлення (медичного) зображення з вимірних даних датчика. Наприклад, реконструкція за допомогою МРТ перетворює дані, зібрані з радіочастотної котушки голови МРТ-сканера, на зображення голови, яке може бути легко інтерпретовано людиною-спостерігачем. Реконструкція зображення часто відбувається на самому сканері, але офлайн-реконструкція може бути дуже важливою для спеціалізованих дослідницьких

застосувань. Аналіз зображень стосується обчислювальних методів подальшої обробки зображень, метою яких є вилучення з них клінічно значущої інформації. Протягом останнього десятиліття спостерігається посилення зусиль у розробці методів аналізу зображень на основі ШІ, зокрема методів, що базуються на глибоких нейронних мережах. Ці моделі на їх основі можуть у певних умовах демонструвати чудову продуктивність, яка може конкурувати з людською [2, 3]. Wang, et al. (2024) [11] показав, що просторово-часовий трансформатор ініціює реконструкцію, моделюючи часові та просторові кореляції, а потім уточнює її за допомогою нейронних мереж. Ця інтеграція зменшує неточності, спричинені пошкодженими кадрами, та зменшує кількість ітерацій нейронних мереж, підвищуючи обчислювальну ефективність без шкоди для якості МРТ-реконструкції.

Інформація, яка отримана за допомогою програм машинного навчання, формує зображення, які можуть бути нерозрізнені під час візуального огляду, що може покращити прогностичну та діагностичну цінність наборів даних радіологічних досліджень [1, 3]. В метааналізі Ahmad R. (2021). [1] було встановлено, що специфічність для всіх моделей глибокого навчання визначається від 39% до 100%, тоді як чутливість від 85% до 100%. Сукупна чутливість та специфічність становили 89% та 85% для алгоритмів глибокого навчання для виявлення аномалій порівняно з 75% та 91% для фахівців з радіології відповідно.

Програми спостереження за допомогою ШІ можуть допомогти радіологам розставляти пріоритети у робочих списках, виявляючи підозрілі або позитивні випадки для раннього розгляду. Серед різних клінічних застосувань найбільш широке визнання отримало використання програмного забезпечення на основі штучного інтелекту як інструменту автоматизованого виявлення, який допомагає радіологам або лікарям виявляти незначні аномалії. Програми ШІ можуть використовуватися для вилучення «радіомічної» інформації із зображень, які неможливо розгледіти візуально, що потенційно збільшує діагностичну та прогностичну цінність, отриману з наборів даних зображень [3, 14].

Кількісний аналіз радіологічних зображень може допомогти у прийнятті рішень та покращити догляд за пацієнтами. Так, завдяки алгоритмам ШІ можна автоматично підвищувати контрастність, зменшувати шум та виправляти артефакти, що дозволяє отримати чіткі знімки, навіть при низькій якості початкового зображення [2]. Крім того, обробка зображень відбувається у реальному часі, ШІ здатен швидко аналізувати та обробляти знімки, забезпечуючи високий рівень деталізації та контрасту під час самих процедур, що підвищує точність діагностики.

Деякі системи ШІ сприяють шумозаглушенню даних, отриманих при значно нижчих рівнях радіації, ніж потрібно було раніше, що призводить до оптимізації отримання зображень зі значно низьким радіаційним навантаженням. При застосуванні ШІ в візуалізації, методи реконструкції зображень на

основі глибокого навчання вже продемонстрували потенціал для зниження дози опромінення. Нові технології КТ дозволяють зменшити дозу опромінення без втрати якості зображення. Наприклад, спектральна КТ забезпечує більш детальний аналіз тканин за їх складом, що покращує диференціацію злоякісних та доброякісних утворень. Динамічна КТ використовується для оцінки кровотоку в органах і пухлинах, що є критично важливим в онкології [15].

III також допомагає мінімізувати артефакти, застосовуючи алгоритми обробки зображень під час або після етапів реконструкції [5]. Програми поглибленого навчання можуть сприяти автоматизованій інтерпретації зображень. Ці технології не лише підвищують якість зображень, а й дозволяють зробити процес візуалізації більш швидким, точним та безпечним для пацієнтів. Крім того, за допомогою алгоритмів III можна передбачити погіршення стану пацієнта, аналізуючи його дані [4, 16, 17]. Особливо це має велике значення при обстеженні дітей. Так, в роботі Goeral, et al. (2019) [18] було встановлено, що ультразвукове дослідження головного мозку за допомогою доплерографії з інтенсивним мікросудинним скануванням є можливим та добре відтворюваним, а також забезпечує новий неінвазивний інструмент візуалізації для оцінки внутрішньопаренхіматозних мікросудин мозку (екстрастріарних та стріарних мікросудин) у новонароджених без використання контрасту. Загалом, показники були кращими на коронарних проєкціях, ніж на сагітальних проєкціях. В коронарних проєкціях мікросудини можна було ідентифікувати у 90-100%, медулярні мікросудини – у 95-100%. На глибоких скануваннях кортикальні та медулярні мікросудини були видимі у всіх випадках, тоді як стріарні мікросудини можна було ідентифікувати у 71% випадків [18].

В наш час стандарт методів рентгенівської візуалізації спирається на дві технологічні платформи: фіксовані С-подібні апарати в одно- та двоплщинних конфігураціях для дво- (2D), три- (3D) та чотиривимірної (4D) візуалізації, а також спіральні КТ-сканери, які все частіше інтегруються з фіксованими С-подібними апаратами в гібридних конфігураціях. З моменту першого повідомлення про використання стереотаксичної КТ, виконаної з використанням головки апарата, у 1976 році, технологія КТ значно розвинулась. Фіксовані С-подібні апарати тепер універсально включають цифрові рентгенівські детектори з плоскими панелями, пропонують вищу швидкість руху обертів для 3D-візуалізації (<5 секунд) та включають роботизовані платформи з широким діапазоном можливостей руху [7, 19]. Сучасні багатодетекторні КТ-сканери можуть візуалізувати все тіло за <5 секунд, а весь грудний відділ, черевну порожнину та таз – менш ніж за дві секунди для найвимогливіших пацієнтів та клінічних умов з часом обертання до 0,25 секунди та охопленням сканування до 16 см за один оберт [20]. За той самий період спіральні КТ-сканери перейшли від односекційних детекторів до детекторамів, які мають багатосекційні можливості (наприклад, 64–320 рядів детекторів) з вищою швидкістю сканування та об'ємним покриттям. Конструкції сканерів, призначені для інтервенційного

відділення, тепер мають поздовжнє (по осі z) покриття без руху столу завдяки напрямним на підлозі, що формує основу для гібридного комплексу «ангіо-КТ» з С-подібною дужкою (одноплощинною або двоплощинною, як правило, перша), інтегрованою з КТ-сканером. Ці технології забезпечують спектр можливостей візуалізації для інтервенційного керівництва. С-подібні дужки для фіксованого приміщення мають режими 2D флюороскопії, 2D та 3D цифрової субтракційної ангіографії та конусно-променевої КТ-візуалізації, а також нові можливості 4D цифрової субтракційної ангіографії та перфузійної візуалізації. Технології 3D- та 4D-візуалізації відкривають нові можливості для якісного аналізу внутрішніх структур організму. 3D-друк на основі радіологічних знімків використовується для моделювання хірургічних втручань, а 4D-візуалізація дає змогу оцінювати рухи органів у режимі реального часу [7].

Слід зазначити, що за допомогою інтеграції цифрових технологій в радіологічній діагностиці лікарі та медичні установи можуть отримувати швидко та якісну інтерпретацію знімків без необхідності фізичної присутності радіолога. Основні аспекти використання ШІ в цій сфері є можливість дистанційної інтерпретації зображень. Так, лікарі можуть аналізувати знімки КТ, МРТ, рентгенографії або УЗД, отримані в будь-якому медичному закладі, та надавати висновки через захищені цифрові онлайн платформи. Крім того, медичні установи можуть співпрацювати з великими телерадіологічними центрами, що дозволяє зменшити навантаження на власних лікарів та прискорити отримання результатів.

**Висновки.** Сучасні технологічні можливості у рентгенології кардинально трансформують медичну діагностику, підвищуючи її точність та швидкість, одночасно зменшуючи променеве навантаження на пацієнтів та сприяючи розвитку персоналізованої медицини. Завдяки можливостям штучного інтелекту, технології методів візуалізації здатні швидко та з високою точністю аналізувати медичні зображення, виявляти аномалії та забезпечувати більш раннє й точніше діагностування. Алгоритми штучного інтелекту також можуть прогнозувати погіршення стану пацієнтів, аналізуючи їх дані, що дає змогу своєчасно втрутитися та покращити результати лікування. У майбутньому очікується ще більша інтеграція штучного інтелекту, розвиток нових методів діагностики та удосконалення технологій візуалізації, що зробить медичну практику ще більш ефективною.

### *Література*

1. Ahmad R. Reviewing the relationship between machines and radiology: the application of artificial intelligence. *Acta radiologica open*. 2021. Vol. 10(2). P. 2058460121990296. <https://doi.org/10.1177/2058460121990296>.
2. Escudero Sanchez L., Buddenkotte T., Al Sa'd M., McCague C., Darcy J., Rundo L., Samoshkin A., Graves M. J., Hollamby V., Browne P., Crispin-Ortuzar M., Woitek R., Sala E., Schönlieb C. B., Doran S. J., Öktem O. Integrating Artificial Intelligence Tools in the Clinical Research Setting: The Ovarian Cancer Use Case. *Diagnostics* (Basel, Switzerland). 2023. Vol. 13(17). P. 2813. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172813>.

3. Thrall J. H., Li X., Li Q., Cruz C., Do S., Dreyer K., Brink J. Artificial Intelligence and Machine Learning in Radiology: Opportunities, Challenges, Pitfalls, and Criteria for Success. *Journal of the American College of Radiology: JACR*. 2018. Vol. 15(3 Pt B). P. 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2017.12.026>.

4. Бойченко О., Бублій Т. Перспективи використання штучного інтелекту в медичній сфері. *Актуальні проблеми сучасної медицини: Вісник Української медичної стоматологічної академії*. 2024. Том 24(3). С. 137-139. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.24.3.137>.

5. Gampala S., Vankeshwaram V., Gadula S. S. P. Is Artificial Intelligence the New Friend for Radiologists? A Review Article. *Cureus*. 2020. Vol. 12(10). P. e11137. <https://doi.org/10.7759/cureus.11137>.

6. Kapoor N., Lacson R., Khorasani R. Workflow Applications of Artificial Intelligence in Radiology and an Overview of Available Tools. *Journal of the American College of Radiology: JACR*. 2020. Vol. 17(11). P. 1363–1370. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2020.08.016>.

7. Brock K. K., Chen S. R., Sheth R. A., Siewerdsen J. H. Imaging in Interventional Radiology: 2043 and Beyond. *Radiology*. 2023. Vol. 308(1). P. e230146. <https://doi.org/10.1148/radiol.230146>.

8. Gallée L., Kniesel H., Ropinski T., Götz M. Artificial intelligence in radiology - beyond the black box. Künstliche Intelligenz in der Radiologie – jenseits der Black-Box. *RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin*. 2023. Vol. 195(9). P. 797–803. <https://doi.org/10.1055/a-2076-6736>.

9. Stueckle C. A., Haage P. The radiologist as a physician - artificial intelligence as a way to overcome tension between the patient, technology, and referring physicians - a narrative review. *Der Arzt im Radiologen – künstliche Intelligenz als Möglichkeit, das Spannungsfeld zwischen Patient, Technik und Zuweisern zu lösen – ein narratives Review. RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin*. 2024. Vol. 196(11). P. 1115–1124. <https://doi.org/10.1055/a-2271-0799>.

10. Singh R., Wu W., Wang G., Kalra M. K. Artificial intelligence in image reconstruction: The change is here. *Physica medica : PM : an international journal devoted to the applications of physics to medicine and biology : official journal of the Italian Association of Biomedical Physics (AIFB)*. 2020. Vol. 79. P. 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.11.012>.

11. Wang S., Cheng H., Ying L., Xiao T., Ke Z., Zheng H., Liang D. DeepcomplexMRI: Exploiting deep residual network for fast parallel MR imaging with complex convolution. *Magnetic resonance imaging*. 2020. Vol. 68. P. 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2020.02.002>.

12. Heckel R., Jacob M., Chaudhari A., Perlman O., Shimron E. Deep learning for accelerated and robust MRI reconstruction. *Magma (New York, N.Y.)*. 2024. Vol. 37(3). P. 335–368. <https://doi.org/10.1007/s10334-024-01173-8>.

13. Knoll F., Hammernik K., Zhang C., Moeller S., Pock T., Sodickson D. K., Akçakaya M. Deep-Learning Methods for Parallel Magnetic Resonance Imaging Reconstruction: A Survey of the Current Approaches, Trends, and Issues. *IEEE signal processing magazine*. 2020. Vol. 37 (1). P. 128–140. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2950640>.

14. Waite S., Farooq Z., Grigorian A., Siström C., Kolla S., Mancuso A., Martinez-Conde S., Alexander R. G., Kantor A., Macknik S. L. A Review of Perceptual Expertise in Radiology-How it develops, How we can test it, and Why humans still matter in the era of Artificial Intelligence. *Academic radiology*. 2020. Vol. 27(1). P. 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.018>.

15. Tapper W., Carneiro G., Mikropoulos C., Thomas S. A., Evans P. M., Boussios S. The Application of Radiomics and AI to Molecular Imaging for Prostate Cancer. *Journal of personalized medicine*. 2024. Vol. 14(3). P. 287. <https://doi.org/10.3390/jpm14030287>.

16. Hong S., Hwang E. J., Kim S., Song J., Lee T., Jo G. D., Choi Y., Park C. M., Goo J. M. Methods of Visualizing the Results of an Artificial-Intelligence-Based Computer-Aided Detection System for Chest Radiographs: Effect on the Diagnostic Performance of Radiologists. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*. 2023. Vol. 13(6). P. 1089. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13061089>.

17. European Society of Radiology (ESR) Current practical experience with artificial intelligence in clinical radiology: a survey of the European Society of Radiology. *Insights into imaging*. 2022. Vol. 13(1). P. 107. <https://doi.org/10.1186/s13244-022-01247-y>.

18. Goeral K., Hojreh A., Kasprian G., Klebermass-Schrehof K., Weber M., Mitter C., Berger A., Prayer D., Brugger P. C., Vergesslich-Rothschild K., Patsch J. M. Microvessel ultrasound of neonatal brain parenchyma: feasibility, reproducibility, and normal imaging features by superb microvascular imaging (SMI). *European radiology*. 2019. Vol. 29(4). P. 2127–2136. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5743-1>.

19. Xudong Y., Weihong L., Feng X., Yanli L., Weishun L., Fengjun Z., Jiao G., Jiawei L., Xiaolu H., Huailiang H., Jianye L., Sihui Z., Chuanmiao X., Hanhui L., Liang M. Artificial intelligence-based CT metrics used in predicting clinical outcome of COVID-19 in young and middle-aged adults. *Medical physics*. 2022. Vol. 49(8). P. 5604–5615. <https://doi.org/10.1002/mp.15803>.

20. Jun K., Lee H. Quantum optimization algorithms for CT image segmentation from X-ray data. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15(1). P. 20649. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08453-w>.

### References

1. Ahmad, R. (2021). Reviewing the relationship between machines and radiology: the application of artificial intelligence. *Acta radiologica open*, 10(2), 2058460121990296. <https://doi.org/10.1177/2058460121990296>.

2. Escudero Sanchez, L., Buddenkotte, T., Al Sa'd, M., McCague, C., Darcy, J., Rundo, L., Samoshkin, A., Graves, M. J., Hollamby, V., Browne, P., Crispin-Ortuzar, M., Woitek, R., Sala, E., Schönlieb, C. B., Doran, S. J., & Öktem, O. (2023). Integrating Artificial Intelligence Tools in the Clinical Research Setting: The Ovarian Cancer Use Case. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 13(17), 2813. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172813>.

3. Thrall, J. H., Li, X., Li, Q., Cruz, C., Do, S., Dreyer, K., & Brink, J. (2018). Artificial Intelligence and Machine Learning in Radiology: Opportunities, Challenges, Pitfalls, and Criteria for Success. *Journal of the American College of Radiology: JACR*, 15(3 Pt B), 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2017.12.026>.

4. Boychenko, O., & Bublik, T. (2024). Prospects for the use of artificial intelligence in the medical field. *Actual problems of modern medicine: Bulletin of the Ukrainian Medical Stomatological Academy*, 24(3), 137-139. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.24.3.137>.

5. Gampala, S., Vankeshwaram, V., & Gadula, S. S. P. (2020). Is Artificial Intelligence the New Friend for Radiologists? A Review Article. *Cureus*, 12(10), e11137. <https://doi.org/10.7759/cureus.11137>.

6. Kapoor, N., Lacson, R., & Khorasani, R. (2020). Workflow Applications of Artificial Intelligence in Radiology and an Overview of Available Tools. *Journal of the American College of Radiology: JACR*, 17(11), 1363–1370. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2020.08.016>.

7. Brock, K. K., Chen, S. R., Sheth, R. A., & Siewerdsen, J. H. (2023). Imaging in Interventional Radiology: 2043 and Beyond. *Radiology*, 308(1), e230146. <https://doi.org/10.1148/radiol.230146>.

8. Gallée, L., Kniesel, H., Ropinski, T., & Götz, M. (2023). Artificial intelligence in radiology - beyond the black box. *Künstliche Intelligenz in der Radiologie – jenseits der Black-Box. RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin*, 195(9), 797–803. <https://doi.org/10.1055/a-2076-6736>.

9. Stueckle, C. A., & Haage, P. (2024). The radiologist as a physician - artificial intelligence as a way to overcome tension between the patient, technology, and referring physicians - a narrative review. *Der Arzt im Radiologen – künstliche Intelligenz als Möglichkeit, das Spannungsfeld zwischen Patient, Technik und Zuweisern zu lösen – ein narratives Review. RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin*, 196(11), 1115–1124. <https://doi.org/10.1055/a-2271-0799>.

10. Singh, R., Wu, W., Wang, G., & Kalra, M. K. (2020). Artificial intelligence in image reconstruction: The change is here. *Physica medica. PM: an international journal devoted to the applications of physics to medicine and biology: official journal of the Italian Association of Biomedical Physics (AIFB)*, 79, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.11.012>.
11. Wang, S., Cheng, H., Ying, L., Xiao, T., Ke, Z., Zheng, H., & Liang, D. (2020). DeepcomplexMRI: Exploiting deep residual network for fast parallel MR imaging with complex convolution. *Magnetic resonance imaging*, 68, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2020.02.002>.
12. Heckel, R., Jacob, M., Chaudhari, A., Perlman, O., & Shimron, E. (2024). Deep learning for accelerated and robust MRI reconstruction. *Magma (New York, N.Y.)*, 37(3), 335–368. <https://doi.org/10.1007/s10334-024-01173-8>.
13. Knoll, F., Hammernik, K., Zhang, C., Moeller, S., Pock, T., Sodickson, DK, & Akçakaya, M. (2020). Deep-Learning Methods for Parallel Magnetic Resonance Imaging Reconstruction: A Survey of the Current Approaches, Trends, and Issues. *IEEE signal processing magazine*, 37 (1), 128–140. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2950640>.
14. Waite, S., Farooq, Z., Grigorian, A., Siström, C., Kolla, S., Mancuso, A., Martinez-Conde, S., Alexander, R. G., Kantor, A., & Macknik, S. L. (2020). A Review of Perceptual Expertise in Radiology-How it develops, How we can test it, and Why humans still matter in the era of Artificial Intelligence. *Academic radiology*, 27(1), 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.018>.
15. Tapper, W., Carneiro, G., Mikropoulos, C., Thomas, S. A., Evans, P. M., & Boussios, S. (2024). The Application of Radiomics and AI to Molecular Imaging for Prostate Cancer. *Journal of personalized medicine*, 14(3), 287. <https://doi.org/10.3390/jpm14030287>.
16. Hong, S., Hwang, E. J., Kim, S., Song, J., Lee, T., Jo, G. D., Choi, Y., Park, C. M., & Goo, J. M. (2023). Methods of Visualizing the Results of an Artificial-Intelligence-Based Computer-Aided Detection System for Chest Radiographs: Effect on the Diagnostic Performance of Radiologists. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 13(6), 1089. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13061089>.
17. European Society of Radiology (ESR) (2022). Current practical experience with artificial intelligence in clinical radiology: a survey of the European Society of Radiology. *Insights into imaging*, 13(1), 107. <https://doi.org/10.1186/s13244-022-01247-y>.
18. Goeral, K., Hojreh, A., Kasprian, G., Klebermass-Schrehof, K., Weber, M., Mitter, C., Berger, A., Prayer, D., Brugger, P. C., Vergesslich-Rothschild, K., & Patsch, J. M. (2019). Microvessel ultrasound of neonatal brain parenchyma: feasibility, reproducibility, and normal imaging features by superb microvascular imaging (SMI). *European radiology*, 29(4), 2127–2136. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5743-1>.
19. Xudong, Y., Weihong, L., Feng, X., Yanli, L., Weishun, L., Fengjun, Z., Jiao, G., Jiawei, L., Xiaolu, H., Huailiang, H., Jianye, L., Sihui, Z., Chuanmiao, X., Hanhui, L., & Liang, M. (2022). Artificial intelligence-based CT metrics used in predicting clinical outcome of COVID-19 in young and middle-aged adults. *Medical physics*, 49(8), 5604–5615. <https://doi.org/10.1002/mp.15803>.
20. Jun, K., & Lee, H. (2025). Quantum optimization algorithms for CT image segmentation from X-ray data. *Scientific reports*, 15(1), 20649. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08453-w>.