

RYMARZ, Anna, GRABOWSKA, Ewa, WOJTALA, Laura, MUSIAŁ, Lena, MOŹDŹYŃSKA, Agnieszka, KAPŁON, Kamil, KAMIŃSKA, Izabela, KOJDER, Dominika and SIERPIEŃ, Małgorzata. Future of cardiovascular diagnosis with the support of artificial intelligence. *Journal of Education, Health and Sport*. 2023;44(1):11-22. eISSN 2391-8306. <http://dx.doi.org/10.12775/JEHS.2023.44.01.001>  
<https://apcz.umk.pl/JEHS/article/view/45179>  
<https://zenodo.org/record/8238884>

The journal has had 40 points in Ministry of Education and Science of Poland parametric evaluation. Annex to the announcement of the Minister of Education and Science of 17.07.2023 No. 32318. Has a Journal's Unique Identifier: 201159. Scientific disciplines assigned: Physical Culture Sciences (Field of Medical sciences and health sciences); Health Sciences (Field of Medical Sciences and Health Sciences). Punkty Ministerialne z 2019 - aktualny rok 40 punktów. Załącznik do komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 17.07.2023 Lp. 32318. Posiada Unikatowy Identyfikator Czasopisma: 201159. Przypisane dyscypliny naukowe: Nauki o kulturze fizycznej (Dziedzina nauk medycznych i nauk o zdrowiu); Nauki o zdrowiu (Dziedzina nauk medycznych i nauk o zdrowiu).

© The Authors 2023;

This article is published with open access at License Open Journal Systems of Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland

Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author (s) and source are credited. This is an open access article licensed under the terms of the Creative Commons Attribution Non commercial license Share alike.

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) which permits unrestricted, non commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the work is properly cited.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Received: 18.07.2023. Revised:10.08.2023. Accepted: 11.08.2023. Published: 18.08.2023.

## FUTURE OF CARDIOVASCULAR DIAGNOSIS WITH THE SUPPORT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Authors:

Anna Rymarz ORCID: 0000-0003-3387-1569, [ania\\_rymarz@onet.pl](mailto:ania_rymarz@onet.pl), Szpital MSWiA w Lublinie, ul. Grenadierów 3, 20-331 Lublin;

Ewa Grabowska, ORCID: 0000-0003-1426-5205, [ewamich343@gmail.com](mailto:ewamich343@gmail.com), Nowodworskie Centrum Medyczne ul. Miodowa 2, 05-100 Nowy Dwór Mazowiecki;

Laura Wojtala ORCID: 0000-0002-5715-2334, [lauramwojtala@gmail.com](mailto:lauramwojtala@gmail.com), Uniwersytecki Szpital Kliniczny w Poznaniu, ul. Przybyszewskiego 49, 60-355 Poznań;

Lena Musiał ORCID: 0000-0002-1998-6477, [musialka96@gmail.com](mailto:musialka96@gmail.com), Szpital Średzki Serca Jezusowego Sp. z o.o. ul. Żwirki i Wigury 10, 63-000 Środa Wielkopolska;

Agnieszka Możdżyńska ORCID: 0000-0001-8590-0486, [a.mozdzyńska@icloud.com](mailto:a.mozdzyńska@icloud.com), Szpital Średzki Serca Jezusowego Sp. z o.o. ul. Żwirki i Wigury 10, 63-000 Środa Wielkopolska;

Kamil Kapłon ORCID: 0000-0002-8110-9352, [kamil.kaplon.2022@gmail.com](mailto:kamil.kaplon.2022@gmail.com), Uniwersytecki Szpital Kliniczny w Poznaniu, ul. Przybyszewskiego 49, 60-355 Poznań;

Izabela Kamińska, ORCID: 0000-0002-5766-2262, [izakam303@gmail.com](mailto:izakam303@gmail.com), Szpital Czerniakowski sp. z o. o., ul. Stępińska 19/25 , 00-739 Warszawa;

Dominika Kojder, ORCID: 0000-0002-8915-4959, [dominika.kojder9@gmail.com](mailto:dominika.kojder9@gmail.com), Samodzielny Publiczny Zakład Opieki Zdrowotnej w Przeworsku ul. Szpitalna 16 37-200 Przeworsk;

Małgorzata Sierpień: ORCID: 0000-0002-0119-2775, [m.sierpien97@wp.pl](mailto:m.sierpien97@wp.pl), 1 Wojskowy Szpital Kliniczny z Polikliniką SPZOZ, Al. Raławickie 23, 20-049 Lublin

ABSTRACT:

**Introduction:**

Term *Artificial intelligence* was used for the first time by John McCarthy in 1956, from that time we can observe its great development, especially in the past decade. Nowadays, Artificial intelligence present a great influence in every aspect of human life, also health care. In times of digitalization, great data bases it can enable an improvement in all aspects of healthcare system such as prevention, screening and treatment of diseases.

**Purpose:**

The main purpose of the work was to present the basic aspects related to artificial intelligence. Another important aspect of the article was to indicate the possibilities related to their use in cardiology to improve the effectiveness of doctors and make medical treatment more detailed and personalized, but also to clarify terms related do AI, such as machine learning or deep learning.

**Materials and methods:**

For the purpose of writing this article, the available literature was reviewed. Using keywords such as artificial intelligence, cardiology, machine learning, echocardiography, deep learning, data bases PubMed we were searching for various clinical trials, meta analysis and randomized controlled trials from past 5 years.

**Results:**

According to the data published on the website of the World Health Organization (WHO), cardiovascular diseases remain the main cause of mortality worldwide. It is the reason of the great interest in its use in cardiology. Algorithms based on artificial intelligence are also used in electrocardiography. The use of artificial intelligence can improve the estimation of cardiovascular risk. Its use in the healing process is also being investigated.

**Conclusion:**

Artificial intelligence is used in many fields, including medicine. Its use may have a positive impact on the quality of medical care. Artificial intelligence also has numerous limitations. Due to this, it is necessary to develop and improve artificial intelligence.

**Key words:**

Artificial intelligence, cardiology, machine learning, echocardiography, electrokardiography, atrial fibrillation, deep learning, data bases

## SZTUCZNA INTELIGENCJA W KARDIOLOGII

**WSTĘP:**

W obecnych czasach sztuczna inteligencja staje się coraz bardziej popularna. Rozwój sztucznej inteligencji rozpoczął się w poprzednim wieku. W ostatnich latach jest on natomiast dużo szybszy [1]. Jest ona wykorzystywana w wielu aspektach życia łącznie z medycyną. Nasze szczególne zainteresowanie wzbudza zastosowanie sztucznej inteligencji w kardiologii ze względu na duże rozpowszechnienie chorób sercowo-naczyniowych [2]. Zgodnie z danymi publikowanymi na stronach Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) choroby sercowo-naczyniowe zarówno w Polsce jak i za granicą pozostają główną przyczyną umieralności ludzi na Świecie. W 2019 roku zgony w przebiegu chorób sercowo-naczyniowych stanowiły 32% wszystkich zgonów. W 85 % przyczyną tych zgonów był zawał serca lub udar mózgu.[3]. Zgony przedwczesne definiowane przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) jako zgony przed 70 rokiem życia, w 2019 roku były spowodowane chorobami sercowo-naczyniowymi w 38% przypadków. Ze względu na te dane zapobieganie wystąpieniu chorób sercowo-naczyniowych jest kluczowe. Bardzo istotne jest również ich wczesne wykrywanie wpływające korzystnie na rokowanie pacjentów, których one dotyczą.

**CEL:**

Celem pracy jest przybliżenie podstawowych pojęć związanych ze Sztuczną Inteligencją oraz przedstawienie zastosowania jej metod w obrazowaniu serca, diagnostyce, szczegółowych badaniach, szacowaniu ryzyka oraz leczeniu Pacjentów z chorobami układu

sercowo - naczyniowego. Ponadto istotnym aspektem tej pracy jest także zwrócenie uwagi na rozpowszechnienie chorób sercowo-naczyniowych i konieczność podejmowania działań mających na celu zapobieganie ich wystąpieniu.

#### METODY:

Artykuł został napisany na podstawie informacji pochodzących z prac przeglądowych, metaanaliz oraz randomizowanych badań naukowych zawartych w serwisie PubMed. Słowa klucz, które zastosowaliśmy pozwoliły uzyskać najbardziej precyzyjne materiały. Dane statystyczne przedstawione w dalszej części artykułu pochodzą z oficjalnych publikacji Światowej Organizacji Zdrowia.

#### OPIS STANU WIEDZY:

Choroby sercowo-naczyniowe –definicja, czynniki ryzyka, epidemiologia.

Zgodnie z definicją publikowaną na stronach Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) do grup chorób sercowo-naczyniowych zaliczane są choroby serca w tym choroba niedokrwienna, reumatyczna, wrodzone wady serca a także choroby naczyń mózgowych, tętnic obwodowych oraz zatorowość płucna i zakrzepica żył głębokich [3]. Na przestrzeni lat zidentyfikowano wiele czynników ryzyka powiązanych z wyżej wymienionymi chorobami. Podzielono je na czynniki modyfikowalne i niemodyfikowane. Najważniejszym niemodyfikowalnym czynnikiem ryzyka jest wiek [4]. Do czynników modyfikowalnych zalicza się między innymi palenie tytoniu, spożywanie alkoholu, siedzący tryb życia oraz niezdrową dietę [5],[3]. Wyżej wymienione czynniki ryzyka wiążą się z manifestacjami klinicznymi takimi jak nadciśnienie tętnicze, nadwaga, otyłość, dyslipidemia oraz hiperglikemia [5], [4],[3], które wywierają negatywny wpływ na układ sercowo-naczyniowy. W celu zapobiegania występowaniu chorób sercowo-naczyniowych należy propagować zdrowy styl życia. Istotne jest stosowanie zdrowej zbilansowanej diety w tym zwiększenie spożycia warzyw i owoców oraz zmniejszenie spożycia soli oraz tłuszczów. Należy także ograniczyć spożywanie używek w tym alkoholu, tytoniu oraz wyrobów tytoniowych [3]. Równie istotną rolę odgrywa aktywność fizyczna. Zgodnie z zaleceniami WHO w celu zapobiegania wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych osoby dorosłe powinny podejmować 150-300 minut aerobowej aktywności fizycznej o umiarkowanej intensywności

tygodniowo (lub równoważną ilość intensywnej aktywności)[6]. W celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia udaru lub zawału należy stosować leczenie farmakologiczne stanów zwiększających to ryzyko takich jak nadciśnienie tętnicze, zaburzenia gospodarki węglowodanowej czy gospodarki lipidowej [3].

### Sztuczna inteligencja w medycynie- podstawowe informacje

Należy wyjaśnić podstawowe pojęcia, które pozwalają w większym stopniu zrozumieć koncepcję sztucznej inteligencji. McCarthy oraz jego współpracownicy wyodrębnili dwa główne filary – uczenie maszynowe (ML) oraz uczenie głębokie (DL) [7]. Nie zapominajmy jednak, iż oba te filary funkcjonują na podstawie ogromnych zbiorów danych, które generują informację z dużą szybkością, co jest ich ogromną zaletą. W kardiologii, zbiory te były opłacane oraz tworzone w ramach współpracy krajowej oraz międzynarodowej celem stworzenia uporządkowanych systemów przechowywania danych [8]. Czym w takim razie jest uczenie maszynowe? Stanowi ono narzędzie, które za pomocą odpowiednich algorytmów przedstawiania danych dokonuje prognoz oraz klasyfikacji. [9] Możemy więc wnioskować, że głównym zadaniem ML jest uzyskiwanie danych pochodzących z różnych źródeł (parametry kliniczne, pomiary, wyniki badań) i przekształcania je w algorytmy służące do przewidywania i opisywania chorób człowieka [9]. Należy również pamiętać, iż efektywność uzyskanych modeli algorytmicznych jest określana za pomocą takich parametrów jak czułość, specyficzność. Uczenie głębokie (DL) jest rodzajem najnowocześniejszych technik uczenia maszynowego, która w ostatnim czasie cieszy się największym zainteresowaniem [10]. Dzięki pobieraniu informacji z wielu źródeł oraz analizowaniu ich w czasie rzeczywistym DL przyniosło ogromny postęp między innymi w analizie obrazowania medycznego [10].

### Wykorzystanie sztucznej inteligencji w celu obrazowania mięśnia sercowego

Na przestrzeni ostatnich czasów można zaobserwować ogromny postęp w obrazowaniu mięśnia sercowego. Sztuczna inteligencja pozwala na dokładniejszą ocenę uzyskiwanych obrazów za pośrednictwem analizy niuansów niedostrzegalnych przez człowieka [11]. Podstawową metodą obrazowania pozostaje echokardiografia, niemniej jednak coraz większą rolę pełni rezonans magnetyczny oraz badania scyntygraficzne. Badanie echokardiograficzne jest badaniem, które charakteryzuje się wieloma zaletami takimi jak łatwa dostępność, niski koszt wykonania badania, nieinwazyjność oraz brak przeciwwskazań. Kluczowym

ograniczeniem badania echokardiograficznego jest zależność otrzymanego wyniku od umiejętności i subiektywnej oceny uwidocznionego obrazu przez specjalistę [1]. Sztuczna inteligencja może mieć zastosowanie w badaniu echokardiograficznym. Badanie naukowe prowadzone przez S. Narula miało na celu określenie przydatności metod sztucznej inteligencji w różnicowaniu kardiomiopatii przerostowej i fizjologicznego przerostu mięśnia sercowego u sportowców. Do badania włączono łącznie 139 pacjentów, których badania echokardiograficzne stanowiły podstawę do opracowania zautomatyzowanego systemu. Wyniki badania sugerują, iż metody oparte na sztucznej inteligencji mogą okazać się pomocne w rozróżnianiu powyższych jednostek szczególnie przez mniej wykwalifikowanych echokardiografistów [12]. Sergio Sanchez-Martinez i współautorzy opisali rolę sztucznej inteligencji w rozpoznawaniu niewydolności serca z zachowaną frakcją skurczową przy pomocy badania echokardiograficznego. Zgodnie z wynikami badania, które przeprowadzili oni na grupie 156 osób w wieku > 60 lat metody oparte na sztucznej inteligencji korzystnie wpływają na diagnostykę oraz umożliwiają lepsze zrozumienie niewydolności serca z zachowaną frakcją [13]. Zgodnie z wynikami badania prowadzonego przez P. Sengupta i współpracowników zastosowanie sztucznej inteligencji może być pomocne w różnicowaniu kardiomiopatii restrykcyjnej oraz zaciskającego zapalenia osierdzia w badaniu echokardiograficznym [14]. Rezonans magnetyczny mięśnia sercowego umożliwia ocenę jakościową tkanki mięśniowej serca, jej perfuzję, a także ocenę funkcji komór, przepływów czy krążenia wieńcowego [15]. Rezonans magnetyczny serca stanowi istotną rolę w diagnostyce chorób takich jak choroba niedokrwiennej mięśnia sercowego, kardiomiopatia czy zapalenie mięśnia sercowego. Użycie sztucznej inteligencji umożliwiło rozpowszechnienie diagnostyki kardiologicznej przy pomocy MR [16]. Aspektem rozważanym w badaniach naukowych jest określenie przydatności sztucznej inteligencji w różnicowaniu ostrego i przebytego zawału mięśnia sercowego za pomocą rezonansu magnetycznego [17]. W celu jej określenia potrzeba jednak kolejnych badań. Zgodnie z badaniami naukowymi wykorzystanie metod uczenia maszynowego w rezonansie magnetycznym serca umożliwi przewidywanie wyników leczenia nadciśnienia płucnego na podstawie trójwymiarowego ruchu prawej komory [18].

## Wykorzystanie sztucznej inteligencji w elektrokardiografii.

Podstawowe 12 odprowadzeniowe badanie elektrokardiologiczne jest kluczowe w kardiologicznym procesie diagnostycznym. Mimo ogromnego rozpowszechnienia tego badania wciąż bywa ono wyzwaniem dla niektórych osób związanych z ochroną zdrowia. Sztuczna inteligencja została wykorzystana w elektrokardiografii po raz pierwszy w 1996 roku [19]. Wpłynęła ona na zwiększenie wartości diagnostycznej tego badania [20]. Niektóre modele oparte na sztucznej inteligencji osiągają wartość diagnostyczną podobną do wyspecjalizowanych kardiologów [1]. Przykładem jest rozpoznawanie ostrych zespołów wieńcowych na podstawie elektrokardiogramu 12 odprowadzeniowego [1]. Zgodnie z wynikami badań naukowych połączenie metod sztucznej inteligencji z badaniem elektrokardiograficznym umożliwia wykorzystanie go jako badania przesiewowego w przypadku bezobjawowej dysfunkcji lewej komory [21]. W artykułach naukowych opisywane są także modele służące do przewidywania wystąpienia napadowego migotania przedsionków, kardiomiopatii przerostowej, hipokaliemii a nawet służące do określenia płci i wieku na podstawie podstawowego zapisu EKG [1]

## Inne zastosowania sztucznej inteligencji w kardiologii

Sztuczna inteligencja w kardiologii znajduje swoje zastosowanie nie tylko w diagnostyce obrazowej oraz badaniu elektrokardiologicznym. Bada się jej zastosowanie także w procesie leczniczym. Przykładem jest ocena zastosowania metod sztucznej inteligencji w kontroli antykoagulacji w przebiegu migotania przedsionków. Zgodnie z badaniami naukowymi algorytmy oparte na sztucznej inteligencji wykazały pozytywny wpływ na dokładność wyodrębnienia pacjentów, u których korzystny wpływ wywarłaby intensyfikacja monitorowania leczenia lub włączenie leczenia alternatywnego [22]. Zastosowanie sztucznej inteligencji w określaniu dawki warfaryny było oceniane w wielu badaniach. Ze względu na niedostateczną wiarygodność ich wyników należy przeprowadzić kolejne badania w celu sformułowania wiarygodnych wniosków [23]. Badania wykazują, iż dzięki zastosowaniu algorytmów opartych na sztucznej inteligencji można trafniej określić grupę chorych, którzy odniosą korzyść z włączenia leczenia hipolipemizującego przy pomocy statyn [24]. Sztuczna inteligencja może być także pomocna w profilaktyce chorób sercowo-naczyniowych. Przy jej pomocy na podstawie parametrów klinicznych, oceny nasierdziowej tkanki tłuszczowej

oraz uwapnienia w obrębie tętnic wieńcowych można w dokładniejszy sposób przewidywać ryzyko wystąpienia zawału mięśnia sercowego [25].

## WNIOSKI:

Ogromne rozpowszechnienie chorób sercowo-naczyniowych, których definicja została przedstawiona w powyższej części artykułu zarówno w Polsce jak i na całym świecie jest związane z dużym obciążeniem poradni kardiologicznych a także oddziałów kardiologii zachowawczej oraz interwencyjnej. Obserwowany na przestrzeni ostatnich lat rozwój technologiczny umożliwił popularyzację sztucznej inteligencji w wielu dziedzinach życia w tym również w medycynie. Jej zastosowanie w kardiologii pozwala na zwiększenie efektywności pracy lekarzy. Może się to przełożyć na większą dostępność ochrony zdrowia dla pacjentów. Ponad to wykorzystanie sztucznej inteligencji w procesie diagnostyczno-terapeutycznym może korzystnie wpłynąć na jakość świadczonych usług medycznych ułatwiając podążanie za najnowszymi standardami medycznymi oraz wpływając korzystnie na eliminację błędów ludzkich. Zastosowanie sztucznej inteligencji umożliwia także zmniejszenie wydatków związanych z ochroną zdrowia [26], [27]. Liczne korzyści związane ze stosowaniem sztucznej inteligencji skłaniają do podejmowania działań mających na celu jej rozwój i popularyzację. Należy mieć jednak na uwadze jej ograniczenia oraz dominującą rolę lekarzy oraz pozostałych pracowników ochrony zdrowia w procesie diagnostyczno-terapeutycznym. Istotne są także kwestie bezpieczeństwa oraz etyki, które powinny zostać dogłębnie rozpatrzone przed włączeniem rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji do codziennej praktyki klinicznej [7]. Rozwojowi większości chorób sercowo-naczyniowych można skutecznie zapobiegać. Ponad to podjęcie procesu diagnostyczno-terapeutycznego na wczesnym stadium zaawansowania choroby poprawia rokowanie pacjenta. Istotne jest więc popularyzowanie zdrowego stylu życia jako podstawowego sposobu redukcji rozpowszechnienia chorób sercowo-naczyniowych oraz zgonów w ich przebiegu w populacji polskiej oraz światowej.

Autorskie Wkłady: Konceptualizacja, nadzór i administracja projektem: Anna Rymarz; metodologia, oprogramowanie, walidacja, analiza formalna: Małgorzata Sierpień, Izabela Kamińska, badanie, zasoby: Kamil Kapłon, Agnieszka Możdżyńska, Lena Musiał, pisanie — przygotowanie oryginalnego projektu: Laura Wojtala, Dominika Kojder, pisanie — recenzja i



redakcja oraz wizualizacja: Ewa Grabowska. Wszyscy autorzy przeczytali i zgodzili się na opublikowaną wersję manuskryptu.

Finansowanie: badania te nie otrzymały żadnego zewnętrznego finansowania. Oświadczenie instytucjonalnej komisji rewizyjnej: nie dotyczy. Oświadczenie o świadomej zgodzie: nie dotyczy.

Oświadczenie o dostępności danych: opracowano na podstawie danych zgromadzonych w bazie PubMed, danych WHO oraz ogólnodostępnych książek.

Konflikt interesów: autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Nakamura T, Sasano T. Artificial intelligence and cardiology: Current status and perspective. *J Cardiol*. 2022 Mar;79(3):326-333. doi: 10.1016/j.jjcc.2021.11.017. Epub 2021 Dec 9. PMID: 34895982.

[2] Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2019 Apr;28(2):73-81. doi: 10.1080/13645706.2019.1575882. Epub 2019 Feb 27. PMID: 30810430.

[3] [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))

[4] Saeed A, Kampangkaew J, Nambi V. Prevention of Cardiovascular Disease in Women. *Methodist DeBakey Cardiovasc J*. 2017 Oct-Dec;13(4):185-192. doi: 10.14797/mdcj-13-4-185. PMID: 29744010; PMCID: PMC5935277.

[5] Teo KK, Rafiq T. Cardiovascular Risk Factors and Prevention: A Perspective From Developing Countries. *Can J Cardiol*. 2021 May;37(5):733-743. doi: 10.1016/j.cjca.2021.02.009. Epub 2021 Feb 19. PMID: 33610690.

[6] [file:///C:/Users/user/Downloads/WHO-EURO-2021-1204-40953-58211-pol.pdf]

[7] Lopez-Jimenez F, Attia Z, Arruda-Olson AM, Carter R, Chareonthaitawee P, Jouni H, Kapa S, Lerman A, Luong C, Medina-Inojosa JR, Noseworthy PA, Pellikka PA, Redfield MM, Roger VL, Sandhu GS, Senecal C, Friedman PA. Artificial Intelligence in Cardiology: Present and Future. *Mayo Clin Proc*. 2020 May;95(5):1015-1039. doi: 10.1016/j.mayocp.2020.01.038. PMID: 32370835.

- [8] Asselbergs FW, Fraser AG. Artificial intelligence in cardiology: the debate continues. *Eur Heart J Digit Health*. 2021 Oct 18;2(4):721-726. doi: 10.1093/ehjdh/ztab090. PMID: 36713089; PMCID: PMC9708032.
- [9] Johnson KW, Torres Soto J, Glicksberg BS, Shameer K, Miotto R, Ali M, Ashley E, Dudley JT. Artificial Intelligence in Cardiology. *J Am Coll Cardiol*. 2018 Jun 12;71(23):2668-2679. doi: 10.1016/j.jacc.2018.03.521. PMID: 29880128.
- [10] Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, Campbell JP, Lee AY, Raman R, Tan GSW, Schmetterer L, Keane PA, Wong TY. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol*. 2019 Feb;103(2):167-175. doi: 10.1136/bjophthalmol-2018-313173. Epub 2018 Oct 25. PMID: 30361278; PMCID: PMC6362807.
- [11] Pál Maurovich-Horvat, Current trends in the use of machine learning for diagnostics and/or risk stratification in cardiovascular disease, *Cardiovascular Research*, Volume 117, Issue 5, 1 May 2021, Pages e67–e69, <https://doi.org/10.1093/cvr/cvab059>
- [12] Narula S, Shameer K, Salem Omar AM, Dudley JT, Sengupta PP. Machine-Learning Algorithms to Automate Morphological and Functional Assessments in 2D Echocardiography. *J Am Coll Cardiol*. 2016 Nov 29;68(21):2287-2295. doi: 10.1016/j.jacc.2016.08.062. PMID: 27884247.
- [13] Sanchez-Martinez S, Duchateau N, Erdei T, Kunszt G, Aakhus S, Degiovanni A, Marino P, Carluccio E, Piella G, Fraser AG, Bijmens BH. Machine Learning Analysis of Left Ventricular Function to Characterize Heart Failure With Preserved Ejection Fraction. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2018 Apr;11(4):e007138. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.117.007138. PMID: 29661795.
- [14] Sengupta PP, Huang YM, Bansal M, Ashrafi A, Fisher M, Shameer K, Gall W, Dudley JT. Cognitive Machine-Learning Algorithm for Cardiac Imaging: A Pilot Study for Differentiating Constrictive Pericarditis From Restrictive Cardiomyopathy. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2016 Jun;9(6):e004330. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.115.004330. PMID: 27266599; PMCID: PMC5321667.
- [15] Russo V, Lovato L, Ligabue G. Cardiac MRI: technical basis. *Radiol Med*. 2020 Nov;125(11):1040-1055. doi: 10.1007/s11547-020-01282-z. Epub 2020 Sep 16. PMID: 32939626.

- [16] Busse A, Rajagopal R, Yücel S, Beller E, Öner A, Streckenbach F, Cantré D, Ince H, Weber MA, Meinel FG. Cardiac MRI-Update 2020. *Radiologe*. 2020 Nov;60(Suppl 1):33-40. English. doi: 10.1007/s00117-020-00687-1. PMID: 32385547.
- [17] Larroza A, Materka A, López-Lereu MP, Monmeneu JV, Bodí V, Moratal D. Differentiation between acute and chronic myocardial infarction by means of texture analysis of late gadolinium enhancement and cine cardiac magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol*. 2017 Jul;92:78-83. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.04.024. Epub 2017 May 1. PMID: 28624024.
- [18] Dawes TJW, de Marvao A, Shi W, Fletcher T, Watson GMJ, Wharton J, Rhodes CJ, Howard LSGE, Gibbs JSR, Rueckert D, Cook SA, Wilkins MR, O'Regan DP. Machine Learning of Three-dimensional Right Ventricular Motion Enables Outcome Prediction in Pulmonary Hypertension: A Cardiac MR Imaging Study. *Radiology*. 2017 May;283(2):381-390. doi: 10.1148/radiol.2016161315. Epub 2017 Jan 16. PMID: 28092203; PMCID: PMC5398374.
- [19] Dipti Itchhaporia, Artificial intelligence in cardiology, *Trends in Cardiovascular Medicine*, Volume 32, Issue 1, 2022, Pages 34-41, ISSN 1050-1738, <https://doi.org/10.1016/j.tcm.2020.11.007>.
- [20] Attia ZI, Harmon DM, Behr ER, Friedman PA. Application of artificial intelligence to the electrocardiogram. *Eur Heart J*. 2021 Dec 7;42(46):4717-4730. doi: 10.1093/eurheartj/ehab649. PMID: 34534279; PMCID: PMC8500024.
- [21] Attia ZI, Kapa S, Lopez-Jimenez F, McKie PM, Ladewig DJ, Satam G, Pellikka PA, Enriquez-Sarano M, Noseworthy PA, Munger TM, Asirvatham SJ, Scott CG, Carter RE, Friedman PA. Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. *Nat Med*. 2019 Jan;25(1):70-74. doi: 10.1038/s41591-018-0240-2. Epub 2019 Jan 7. PMID: 30617318.
- [22] Jason Gordon, Max Norman, Michael Hurst, Thomas Mason, Carissa Dickerson, Belinda Sandler, Kevin G. Pollock, Usman Farooqui, Lara Groves, Carmen Tsang, David Clifton, Ameet Bakhai, Nathan R. Hill, Using machine learning to predict anticoagulation control in atrial fibrillation: A UK Clinical Practice Research Datalink study, *Informatics in Medicine Unlocked*, Volume 25, 2021, 100688, ISSN 2352-9148, <https://doi.org/10.1016/j.imu.2021.100688>.

- [23] Zhang F, Liu Y, Ma W, Zhao S, Chen J, Gu Z. Nonlinear Machine Learning in Warfarin Dose Prediction: Insights from Contemporary Modelling Studies. *J Pers Med*. 2022 Apr 29;12(5):717. doi: 10.3390/jpm12050717. PMID: 35629140; PMCID: PMC9147332.
- [24] Kakadiaris IA, Vrigkas M, Yen AA, Kuznetsova T, Budoff M, Naghavi M. Machine Learning Outperforms ACC / AHA CVD Risk Calculator in MESA. *J Am Heart Assoc*. 2018 Nov 20;7(22):e009476. doi: 10.1161/JAHA.118.009476. PMID: 30571498; PMCID: PMC6404456.
- [25] Commandeur F, Slomka PJ, Goeller M, Chen X, Cadet S, Razipour A, McElhinney P, Gransar H, Cantu S, Miller RJH, Rozanski A, Achenbach S, Tamarappoo BK, Berman DS, Dey D. Machine learning to predict the long-term risk of myocardial infarction and cardiac death based on clinical risk, coronary calcium, and epicardial adipose tissue: a prospective study. *Cardiovasc Res*. 2020 Dec 1;116(14):2216-2225. doi: 10.1093/cvr/cvz321. PMID: 31853543; PMCID: PMC7750990.
- [26] Otaki, Y., Miller, R.J.H. & Slomka, P.J. The application of artificial intelligence in nuclear cardiology. *Ann Nucl Med* **36**, 111–122 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12149-021-01708-2>
- [27] Watson X, D'Souza J, Cooper D, Markham R. Artificial intelligence in cardiology: fundamentals and applications. *Intern Med J*. 2022 Jun;52(6):912-920. doi: 10.1111/imj.15562. Epub 2022 May 31. PMID: 34613658.