



Możliwość wykorzystania tzw. sztucznej inteligencji do zdalnego monitoringu wpływu zanieczyszczenia powietrza na układ oddechowy – przegląd piśmiennictwa

Possibility of using artificial intelligence for remote monitoring of the impact of air pollution on the respiratory system – literature review

Jakub Szarla¹, B–D , Monika Ścibor¹, A, D–F

¹ Katedra Zdrowia i Środowiska, Wydział Nauk o Zdrowiu, Instytut Zdrowia Publicznego, Uniwersytet – Jagielloński Collegium Medicum, Kraków, Polska

A – Koncepcja i projekt badania, B – Gromadzenie i/lub zestawianie danych, C – Analiza i interpretacja danych, D – Napisanie artykułu, E – Krytyczne zrecenzowanie artykułu, F – Zatwierdzenie ostatecznej wersji artykułu

Szarla J, Ścibor M. Możliwość wykorzystania tzw. sztucznej inteligencji do zdalnego monitoringu wpływu zanieczyszczenia powietrza na układ oddechowy – przegląd piśmiennictwa. Med Srodow. doi:10.26444/ms/210226

■ Streszczenie

Wprowadzenie i cel pracy. W ciągu ostatnich kilku lat wzrosło znaczenie sztucznej inteligencji w różnych dziedzinach życia, przemysłu, nauki i codziennych procesów, a jej użytkowanie stało się łatwą i coraz powszechniejszą praktyką. Tak zwana sztuczna inteligencja zaczęła też być obecna w obszarze nauk medycznych.

Cel pracy. Celem pracy jest przegląd piśmiennictwa z zakresu sztucznej inteligencji StethoMe, który pozwoli na zoptymalizowanie metodologii w zaplanowanym badaniu z wykorzystaniem stetoskopu StethoMe do zdalnego monitoringu wpływu zanieczyszczenia powietrza na układ oddechowy.

Opis stanu wiedzy. Algorytm sztucznej inteligencji zintegrowany z elektronicznym stetoskopem StethoMe jest narzędziem, które osiąga wysoką skuteczność w procesie rozpoznawania i klasyfikacji patologicznych szmerów oddechowych. Bardzo dobrze radzi sobie z odpowiednią analizą ich natężeń. W przeprowadzonym przeglądzie piśmiennictwa nie odnotowano, aby StethoMe było już wykorzystane w zakresie wykrywania zaostrzeń w przewlekłych chorobach układu oddechowego, skorelowanych z zanieczyszczeniami powietrza. Tematyka dotycząca algorytmu sztucznej inteligencji StethoMe jest stosunkowo nowa, niewiele jest zatem badań i publikacji na ten temat.

Podsumowanie. Wykorzystywanie algorytmu SI do monitorowania u pacjentów przez wiele miesięcy szmerów oddechowych przy użyciu StethoMe i skonfrontowanie wyników tej obserwacji z danymi na temat jakości powietrza w otoczeniu badanych pozwoli na nowatorską pogłębioną analizę tych zależności. Ponadto rozwiązanie to może wspomóc diagnostykę osłuchową, redukując subiektywną ocenę lekarza, obniżyć liczbę wizyt stacjonarnych i wspomóc proces monitorowania chorób przewlekłych. StethoMe może poprawić nadzór pozaszpitalny nad indywidualnymi pacjentami, ale wydaje

się też stwarzać możliwość zaplanowania szerszych badań epidemiologicznych.

■ Słowa kluczowe

stetoskop, sztuczna inteligencja, StethoMe, zanieczyszczenia powietrza

■ Abstract

Introduction and Objective In the last few years, an increase has been observed in the importance of artificial intelligence in different areas of life, industry, science and everyday processes, and its use has become easy and common, with a noticeable upward trend. As a result, artificial intelligence has also started to be used in medical science. The aim of the study was review of literature on Stethome artificial intelligence, which will allow the optimisation of the methodology in a planned study using the StethoMe stethoscope for remote monitoring of the effect of air pollution on the respiratory system.

Brief description of the state of knowledge The artificial intelligence algorithm integrated into the StethoMe electronic stethoscope is a tool that achieves high effectiveness in the process of recognising and classifying pathological respiratory murmurs. It performs very well in analysing their intensity. In the literature review no reports were found that StethoMe had already been used to detect exacerbations in chronic respiratory diseases correlated with air pollution. The scope of problems concerning the StethoMe artificial intelligence algorithm is relatively new, so there are few studies and publications on the subject.

Summary The use of an AI algorithm to monitor patients' respiratory murmurs over several months using StethoMe and comparing this data with information on the air quality in the patients' environment will enable an in-depth and innovative analysis of these relationships. In addition, this solution can aid auscultatory diagnosis by reducing the subjective assessment of the physician, reduce the number of inpatient visits, and aid in the monitoring of chronic diseases. StethoMe can improve out-of-hospital surveillance of individual patients,

✉ Autor do korespondencji: Monika Ścibor, Instytut Zdrowia Publicznego, Katedra Zdrowia i Środowiska, Uniwersytet Jagielloński – Collegium Medicum, Wydział Nauk o Zdrowiu, ul. Skawińska 8, 31-066 Kraków, Polska
E-mail: monika.scibor@uj.edu.pl

but it also seems to create opportunities for planning broader epidemiological studies.

WSTĘP

Podstawą bytowania wszystkich istot żyjących jest powietrze. Jednak jest ono zanieczyszczane przez wiele substancji, w tym przez zanieczyszczenia pyłowe, których negatywny wpływ na zdrowie jest niepodważalny [1, 2].

Światowa Organizacja Zdrowia (World Health Organization, WHO) szacuje, że każdego roku dochodzi do milionów zgonów oraz przedwcześnie utraconych lat życia skorelowanych z zanieczyszczeniami powietrza [3, 4]. Polska należy do niechlubnej czołówki państw Unii Europejskiej o najbardziej zanieczyszczonym powietrzu [5]. Według danych Eurostatu w samym 2022 roku pył zawieszony $PM_{2,5}$ był przyczyną ponad 34 tys. przedwczesnych zgonów [6].

Zła jakość powietrza wpływa również na pogorszenie kontroli chorób alergicznych, których częstość występowania niezmiennie wzrasta. Wykazano nie tylko niekorzystny wpływ zanieczyszczeń pyłowych i gazowych na kontrolę astmy oskrzelowej, ale też na obniżenie jakości życia pacjentów [7–10].

W ciągu ostatnich kilku lat wzrosło znaczenie sztucznej inteligencji (SI) w różnych dziedzinach życia, przemysłu, nauki i codziennych procesów, a jej użytkowanie stało się łatwą i coraz bardziej powszechną praktyką. Jej wpływ na życie ludzi jest ogromny i może w zauważalny sposób ułatwiać wykonywanie codziennych czynności i obowiązków. Zainteresowanie sztuczną inteligencją oraz obserwowalny rozwój informatyki wpłynęły na jej rozpowszechnienie w coraz to nowych dziedzinach nauki. Wobec tego sztuczna inteligencja zaczęła też być obecna na obszarze nauk medycznych. Pozwala ona na szybsze diagnozowanie chorób, np. poprzez analizę obrazów medycznych, co może znacznie wspomóc i przyspieszyć pracę lekarzy [11].

Osluchiwanie płuc pacjenta jest praktyką powszechną wśród lekarzy. Jednak ze względu na swoją specyfikę opiera się ono w głównej mierze na subiektywnej ocenie, doświadczeniu i wiedzy lekarza, który to badanie przeprowadza. StethoMe jest odpowiedzią na potrzebę stałego monitorowania stanu zdrowia pacjentów chorujących przewlekle. Pozwala on na samobadanie osłuchowe przy użyciu elektronicznego stetoskopu. Następnie zapisane nagranie analizowane jest przez specjalny algorytm sztucznej inteligencji, który wykrywa patologie w obrębie szmerów oddechowych. Klasyfikuje on dźwięki na: furczenia, świsty, rzężenia grubobańkowe i drobnobańkowe. Wielu lekarzy testujących to rozwiązanie pozytywnie oceniło jego przydatność w opiece nad pacjentem, a sam algorytm sztucznej inteligencji w badaniu przeprowadzonym przez Hafke-Dys i wsp. osiągał wysoką skuteczność w wykrywaniu objawów astmy. Zła jakość powietrza nasila proces zapalny w przebiegu astmy oskrzelowej, pogarszając jej kontrolę, co manifestuje się pojawieniem lub nasileniem patologicznych szmerów oddechowych. StethoMe pozwoli na zdalne monitorowanie wpływu zanieczyszczeń powietrza na układ oddechowy poprzez wczesne wykrycie objawów przedmiotowych.

Rozwiązanie to może być pomocne w diagnostyce osłuchowej, redukując subiektywną ocenę lekarza, oraz ograniczyć liczbę wizyt stacjonarnych i wspomóc proces monitorowania

Key words

stethoscope, artificial intelligence, StethoMe, air pollution

przebiegu chorób przewlekłych. StethoMe może poprawić nadzór pozaszpitalny nad indywidualnymi pacjentami, jak również wydaje się stwarzać możliwości do zaplanowania szerszych badań epidemiologicznych [12–14].

SKUTKI ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA

Prawem każdego człowieka jest oddychanie czystym powietrzem, jednak WHO szacuje, że każdego roku dochodzi do milionów zgonów oraz przedwcześnie utraconych lat życia wynikających z zanieczyszczeń powietrza, a liczba chorób spowodowanych tym czynnikiem jest porównywalna do liczby schorzeń będących efektem niewłaściwej diety czy palenia tytoniu [3, 15]. Polska należy do czołówki krajów Unii Europejskiej z największym odsetkiem zanieczyszczeń powietrza [5]. Narażenie na pył zawieszony $PM_{2,5}$ przedwcześnie odbiera życie ok. 40 tys. Polaków (tab. 1) [6].

Tabela 1. Przedwczesne zgony w Polsce spowodowane narażeniem na pył zawieszony $PM_{2,5}$

Rok	Liczba przedwczesnych zgonów
2015	44 506
2016	41 588
2017	44 862
2018	46 823
2019	35 675
2020	36 562
2021	47 335
2022	34 719

Grupami szczególnie narażonymi na szkodliwe działanie zanieczyszczeń powietrza są dzieci, ludzie starsi, osoby o niższym statusie socjoekonomicznym oraz osoby ze schorzeniami układu oddechowego, układu krążenia, cukrzycą i otyłością [16]. Naturalnie nasz organizm posiada zlokalizowane w przedsiönku nosa struktury w postaci licznych gruczołów potowych i łojowych oraz włosów, których celem jest ochrona organizmu przed dostającymi się do niego wraz z wdychem zanieczyszczeniami zawartymi w powietrzu [17]. Wdychanie zanieczyszczonego powietrza powoduje skutki zdrowotne, które mogą być odczuwane z chwilą narażenia na ekspozycję lub odwołane w czasie. Z reguły pierwszy i najbardziej narażony na dewastacyjne działanie zanieczyszczeń jest układ oddechowy, ponieważ to za jego pośrednictwem w procesie oddychania do organizmu wprowadzane są szkodliwe substancje [18]. Wdychane toksyczne substancje mogą w układzie oddechowym powodować podrażnienie błon śluzowych dróg oddechowych, zmniejszenie poziomu wentylacji płuc oraz spadek pojemności życiowej płuc, obniżyć poziom nasycenia krwi tlenem oraz nasilać przebieg chorób, wśród których ze względu na częstość występowania możemy szczególnie wyróżnić astmę, przewlekłą obturacyjną chorobę płuc, alergiczny nieżyt nosa. Pyły zawieszone w powietrzu w obrębie układu oddechowego są przyczyną pylic płuc oraz różnego rodzaju nowotworów płuc [19].

Zanieczyszczenia powietrza oddziałują praktycznie na każdą komórkę organizmu, przedostając się do nich poprzez krew. Ich wpływ zauważalny jest również w postaci pogorszenia zdrowia reprodukcyjnego kobiet i mężczyzn. Badania dowiodły, że toksyczne substancje zawarte w zanieczyszczonym powietrzu pogarszają u mężczyzn jakość nasienia, u kobiet natomiast negatywnie wpływają na rozwój płodu, mogą powodować m.in. zmiany teratogeniczne, obejmujące np. różnego rodzaju patologie w obrębie układu krążenia czy opóźnienie w rozwoju intelektualnym [20].

Równie silnie narażony na zanieczyszczenia zawarte w powietrzu, ze szczególnym wskazaniem na zanieczyszczenia pyłowe, jest układ sercowo-naczyniowy. W badaniach wykazano korelację pomiędzy wzrostem zanieczyszczeń powietrza a rosnącą liczbą zgonów z powodu chorób układu krążenia. Ponadto na toksyczność zanieczyszczeń pyłowych w obrębie układu sercowo-naczyniowego ma wpływ również rozmiar cząsteczki pyłu – np. mniejsze cząsteczki łatwiej przedostają się z pęcherzyków płucnych do krwiobiegu. Nawet krótkotrwała ekspozycja na pyły zawieszone zwiększa ryzyko występowania zawałów serca czy udarów mózgu, a także rozwój nadciśnienia tętniczego czy cukrzycy typu 2 [18, 21]. Szczególnie narażone na niekorzystne oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza w obrębie tego układu są kobiety [22].

Zanieczyszczenie powietrza ma również zdecydowanie negatywny wpływ na środowisko, działając m.in. na rośliny poprzez upośledzenie procesu fotosyntezy, który jest jednym z najważniejszych procesów biologicznych, jakie w nich zachodzą, a także wywołując zjawisko kwaśnych opadów, które powstają w wyniku połączenia się w powietrzu substancji chemicznych zawartych w gazowych zanieczyszczeniach z wodą [23, 24].

W 2015 roku została opracowana i przyjęta przez 193 państwa Organizacji Narodów Zjednoczonych *Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju*, która zawiera 17 celów zrównoważonego rozwoju. Jednym z nich jest cel 3., o treści: „Zapewnić wszystkim ludziom w każdym wieku zdrowe życie oraz promować dobrobyt” [25], a jednym ze znaczących zadań prowadzących do zrealizowania tego celu „jest znaczące obniżenie do 2030 r. liczby zgonów i chorób powodowanych przez niebezpieczne substancje chemiczne oraz zanieczyszczenie i skażenie powietrza, wody i gleby” [26].

SZTUCZNA INTELIGENCJA

W przeciągu ostatnich lat obserwowalny jest wzrost znaczenia sztucznej inteligencji w wielu dziedzinach życia. Staje się ona obecna w procesach, w których dotychczas główną rolę odgrywał czynnik ludzki. SI potrafi wykonywać zadania w niewielkim czasie dzięki potężnej mocy obliczeniowej systemów komputerowych. Jej użytkowanie stało się łatwą i powszechną praktyką mogącą w zauważalny sposób ułatwiać codzienne czynności i obowiązki. Cały proces powstawania sztucznej inteligencji nie byłby możliwy, gdyby nie stworzenie komputera w latach 40. XX wieku. Jednak samo pojęcie „sztuczna inteligencja” zostało oficjalnie wprowadzone do obiegu w 1956 roku dzięki dwóm amerykańskim informatykom, Marvinowi Minsky'iemu i Johnowi McCarthy'emu. To skupiło uwagę badaczy na tym obszarze i było bodźcem inicjującym liczne badania. Ten etap zapoczątkował w zasadzie dalszy postęp cywilizacyjny, który po wielu latach doprowadził nas do obecnego momentu w historii, gdy

dostęp do programów opartych na sztucznej inteligencji jest bardzo rozpowszechniony [11].

Pomimo że sztuczna inteligencja zdążyła się już zadozwonić we współczesnym świecie, nadal brak jest jej jednoznacznej i jednolitej definicji, nawet w polskim prawodawstwie [27]. Słownik języka polskiego definiuje SI jako „dział informatyki badający reguły rządzące zachowaniami umysłowymi człowieka i tworzący programy lub systemy komputerowe symulujące ludzkie myślenie” [28]. Jednak można natknąć się na wiele definicji sztucznej inteligencji. Jedna z nich pochodzi z raportu *One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)*, opublikowanego w 2016 roku przez Uniwersytet Stanforda. Opisuje ona sztuczną inteligencję jako „systemy komputerowe zaprojektowane do wykonywania zadań, które normalnie wymagają ludzkiej inteligencji, takich jak rozpoznawanie obrazów, rozumienie języka naturalnego, podejmowanie decyzji czy uczenie się” [29]. Sztuczna inteligencja łączy kompetencje z zakresu informatyki, statystyki, matematyki, nauk humanistycznych, filozofii, nauk o społeczeństwie oraz zarządzania [30].

Inicjatywy dotyczące użycia SI w medycynie zapoczątkowane zostały w Stanach Zjednoczonych w latach 70. XX wieku i stały się przedmiotem rozważań naukowców. Sztuczna inteligencja znalazła zastosowanie przede wszystkim w medycznych bazach danych, ponieważ umożliwia archiwizowanie i analizę potężnych zasobów cyfrowych. Wykonywanie tych działań przez człowieka byłoby nader czasochłonne, a w niektórych przypadkach nawet niemożliwe [11]. Przetwarzanie i analiza danych przez sztuczną inteligencję przyniosła też wiele pytań w kontekście niedawnej pandemii COVID-19, ponieważ zaczęto poszukiwać nowych narzędzi, których zadaniem byłoby przewidywanie na podstawie dostarczonych danych zagrożeń epidemiologicznych [30].

Sztuczna inteligencja posiada też umiejętność analizy obrazów, co znajduje zastosowanie w radiologii ze względu na rosnącą liczbę wykonywanych badań diagnostyki obrazowej. W badaniu przeprowadzonym przez Sagara Bharata Shaha z Uniwersytetu w Cincinnati wykorzystano 7023 obrazy rezonansu magnetycznego, które były analizowane przez model głębokiego uczenia o nazwie InceptionV3, którego zadaniem była analiza obrazów mózgu i klasyfikacja ich w podziale na 4 kategorie: brak guzów, guzy przysadki, glejaki i oponiaki. Badanie wykazało, że średnia dokładność wskazanego modelu wynosi 97,12%. Wobec tego technologia ta ma potencjał wsparcia pracy lekarzy i umożliwienie im wcześniej i niezwykle trafne diagnozowanie zmian w mózgu [31].

Podobne wyniki wskazujące na rewolucyjny potencjał sztucznej inteligencji w medycynie osiągnięto w badaniu przeprowadzonym w 2017 roku na Uniwersytecie Stanfordzkim przez grupę badaczy, którzy opracowali innowacyjny algorytm CheXnet, który wykrywa patologiczne zmiany na zdjęciach rentgenowskich płuc. Wyniki badań wskazały na wyższą skuteczność wspomnianego algorytmu w porównaniu do analizy zdjęć dokonanej przez lekarzy radiologów [32].

StethoMe jest elektronicznym stetoskopem, który umożliwia przeprowadzenie badania osłuchowego płuc samodzielnie przez pacjenta oraz analizę nagrania dzięki użyciu sztucznej inteligencji trenowanej na ponad 10 tys. nagraniach osłuchowych. Urządzenie posiada dwa tryby działania, którymi są: kontrola astmy i pełne badanie płuc. Pierwszy z nich przeprowadzany jest w jednym punkcie pomiarowym i mierzy

częstość oddechu, stosunek czasu od wdechu do wydechu oraz tętno i zintensyfikowanie świstów i furczenia. Drugi natomiast obejmuje 6–8 punktów pomiarowych. Liczba punktów jest uzależniona od wieku osoby badanej. Wspierany przez sztuczną inteligencję system w badaniu tym analizuje nagranie, wykrywając świsty, furczenia, rżenia drobno-bańkowe, rżenia grubo-bańkowe oraz takie parametry jak przy pierwszym trybie. Udział pacjenta w badaniu ogranicza się do przykładania stetoskopu we wskazane miejsca, a SI analizuje nagranie w krótkim odstępie czasowym i klasyfikuje wskazane parametry na odpowiedniej skali. Po badaniu pacjent proszony jest o wypełnienie krótkiej ankiety zawierającej pytania o aktualny jego stan. Wszelkie wyniki badania są zapisywane automatycznie w aplikacji, co umożliwia okazywanie ich lekarzowi. Urządzenie jest zarejestrowane w Unii Europejskiej jako wyrób medyczny klasy IIa [14, 33, 34].

CEL PRACY

Celem pracy jest przegląd piśmiennictwa z zakresu sztucznej inteligencji StethoMe, który pozwoli na lepsze ukierunkowanie założeń badawczych w zaplanowanym badaniu z wykorzystaniem stetoskopu StethoMe, służącego do oceny wpływu zanieczyszczeń powietrza, na przebieg i kontrolę wybranych chorób alergicznych poprzez analizę nasilenia zmian osłuchowych.

METODOLOGIA

Dokonano przeglądu bazy danych PubMed i Google Scholar. Słowem kluczowym było „StethoMe”. Wyszukiwanie zawężono do artykułów opublikowanych w latach 2015–2024.

Pomimo zidentyfikowania 100 artykułów zawierających odniesienia do urządzenia StethoMe w bazie danych Google Scholar, po selekcji okazało się, że większość z nich miała charakter przeglądowy lub ograniczała się jedynie do ogólnych, pobieżnych wzmianek. Część publikacji miała charakter biznesowy i odnosiła się do aspektów dotyczących finansowania lub strategii rynkowych. Ze względu na brak merytorycznych treści powiązanych z celem niniejszej pracy nie zostały one włączone do analizy. Tematyka dotycząca StethoMe jest stosunkowo nowa, wobec tego niewiele jest badań i publikacji na ten temat. Spośród uzyskanych rekordów wybrano 6 najważniejszych.

WYNIKI

Emeryk i wsp. w artykule pt. *Home Monitoring of Asthma Exacerbations in Children and Adults with Use of an AI-Aided Stethoscope* opisują badanie, w trakcie którego poddali 6-miesięcznemu badaniu 149 pacjentów z astmą. Zadaniem pacjentów było wykonywanie samobadania przy użyciu stetoskopu wspomaganego sztuczną inteligencją StethoMe, pulsoksymetru oraz miernika szczytowego przepływu wydechowego (PEF). Stetoskop StethoMe rejestrował podczas pomiaru świsty, furczenia, rżenia grubo-bańkowe i drobno-bańkowe oraz puls (HR), stosunek wdechu do wydechu (I/E) i częstość oddechu (RR). Celem tego badania było wskazanie, które parametry odgrywają ważną rolę w procesie wykrywania oraz kontroli zaostrzeń astmy. Ponadto zwrócono

uwagę na rolę StethoMe w tym procesie diagnostycznym ze szczególnym uwzględnieniem dzieci. Pozymskie podczas badania dane były agregowane za pomocą specjalnej aplikacji mobilnej, uwzględniającej subiektywną ocenę stanu zdrowia pacjenta. W ten sposób zdobyto 41 872 nagrań, z czego po analizie 6,4% odrzucono ze względu na ich niedostateczną jakość. Następnie zakwalifikowane wyniki zostały poddane analizie pod kątem oceny zaostrzeń astmy poprzez 17 lekarzy, w tym 2 lekarzy specjalistów chorób wewnętrznych, 4 pulmonologów, 9 pediatrów, 5 alergologów oraz 4 specjalistów medycyny rodzinnej. Aby ocenić skuteczność wskazanych parametrów, użyto modeli uczenia maszynowego, które na podstawie zebranych materiałów umożliwiały przewidywanie przyszłych poziomów zaostrzenia. Jako wskaźnik świadczący o skuteczności posłużył obszar znajdujący się pod krzywą ROC (AUC). Wyniki analizy wykazują, że najwyższa wartość diagnostyczna została osiągnięta przy użyciu wszelkich danych, którymi są: wskazane parametry ze stetoskopu StethoMe, wyniki PEF, badana saturacja oraz wyniki ankiety subiektywnej oceny pacjenta, dzięki czemu uzyskano wynik AUC na poziomie ponad 93% u osób dorosłych i dzieci. Dane uzyskane wyłącznie dzięki użyciu stetoskopu StethoMe również uzyskały wysoką skuteczność, co jest szczególnie ważne, biorąc pod uwagę trudności w diagnostyce osób niewspółpracujących w wykonaniu pomiarów spirometrycznych, np. dzieci w wieku przedszkolnym. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że tego rodzaju stetoskopy mogą w sposób istotny wspierać proces diagnostyki zaostrzeń astmy u wszystkich pacjentów. Jak również mogą przyczynić się do rozwoju telemedycyny i zdalnej opieki nad pacjentem, tym samym redukując liczbę wizyt stacjonarnych u lekarza [34].

Celem badania przeprowadzonego przez Hafke-Dys i wsp. w 2019 roku była ocena umiejętności i skuteczności odpowiedniej klasyfikacji odbiegających od normy szmerów oddechowych w obrębie układu oddechowego przez lekarzy różnych specjalności i studentów medycyny. W badaniu brało udział 185 uczestników (w tym: 16 pulmonologów, 22 pediatrów, 29 lekarzy innych specjalizacji, 50 lekarzy w trakcie stażu i 68 studentów medycyny), których zadaniem było odpowiednie sklasyfikowanie 24 nagrań osłuchowych. Następnie uzyskane odpowiedzi podzielono odpowiednio na 3 kategorie: pełna zgodność ze standardem, częściowa zgodność i brak zgodności. Pozymskie wyniki wskazały, że 59,3% odpowiedzi było całkowicie niezgodnych, 26,2% było częściowo niezgodnych, a jedynie 14,6% było całkowicie zgodnych z opracowanym standardem. Najwyższą skuteczność w rozpoznawaniu patologicznych dźwięków wykazali lekarze pulmonolodzy, a najniższy odsetek odpowiedzi poprawnych zanotowano wśród studentów medycyny. W całym badaniu dla uczestników najłatwiejszymi do wykrycia i sklasyfikowania patologicznymi szmerami oddechowymi były świsty. Z tego względu autorzy wskazują na możliwość tworzenia przy użyciu elektronicznych stetoskopów baz danych, które mogą znaleźć zastosowanie w procesie dydaktycznym oraz tworzeniu nowoczesnych rozwiązań opartych na SI [13].

Kevat i wsp. w swoim badaniu pozyskali, przy użyciu elektronicznych stetoskopów Littman i Clinicloud 3200, 192 nagrania osłuchowe od 25 dzieci, których mediana wieku wynosiła 6,7 lat. Ich celem była weryfikacja skuteczności algorytmu sztucznej inteligencji StethoMe w wykrywaniu zmian patologicznych, ponieważ opiera się na ocenie lekarza i z tego względu mogą występować różnice w interpretacji tych samych dźwięków szmerów oddechowych. Badanie

zostało przeprowadzone jako niezależne i zaślepienie. Nagrania pozyskano od pacjentów Szpitala Dziecięcego Monash w Melbourne w Australii. Zdobyte materiały zostały poddane analizie przez lekarza pulmonologa dziecięcego i odpowiednio oznaczone. Aby potwierdzić zgodność powtórnej klasyfikacji części nagrań dokonał drugi specjalista w ten sam sposób. W porównaniu ocen obu lekarzy uzyskano pełną zgodność. Następnie pliki dźwiękowe przekazano do analizy przez algorytm sztucznej inteligencji StethoMe. Skuteczność narzędzia oceniano przy użyciu dwóch wskaźników: PPA (ang. *positive percent agreement*), który określa, w ilu przypadkach algorytm SI poprawnie rozpozna, że wskazane szmery oddechowe są obecne (odpowiednik czułości), oraz NPA (ang. *negative percent agreement*), który pokazuje, w ilu przypadkach poprawnie rozpozna, że dane szmery nie są obecne (odpowiednik swoistości). W przypadku nagrań pozyskanych za pomocą stetoskopu Clinicloud wskaźnik PPA dla trzszczeń wynosił 95%, a NPA 99%, co oznacza, że jedynie 1% otrzymanych wyników można określić jako wyniki fałszywie dodatnie. Natomiast w przypadku świstów oddechowych wskaźnik PPA wynosił 90%, a NPA 97%. W przypadku nagrań pozyskanych za pomocą tego stetoskopu algorytm sztucznej inteligencji radził sobie bardzo dobrze w wykrywaniu objawów oraz unikaniu wyników fałszywie dodatnich. Jeżeli chodzi o wskaźnik PPA dla trzszczeń w przypadku nagrań pozyskanych przez urządzenie Littman 3200, to algorytm SI StethoMe w 82% przypadków prawidłowo wskazał na ich obecność, natomiast w 96% przypadków odpowiednio zidentyfikował ich brak (NPA). Poprawność wykrywania świstów (PPA) w tym przypadku była na poziomie 80%, a trafność rozpoznania ich braku (NPA) na poziomie 95%. Choć, jak można zauważyć, algorytm osiągał wyższą skuteczność w przypadku nagrań pochodzących ze stetoskopu Clinicloud, z nagraniami ze stetoskopu Littman 3200 również dobrze sobie radził. Może być to spowodowane faktem, że stetoskop elektroniczny Clinicloud nagrywa szmer lepszej jakości. Choć badanie opierało się na stosunkowo niewielkiej próbie, można zauważyć, że algorytm SI StethoMe ma potencjał, aby wspierać diagnostykę osłuchową, tym samym ograniczając subiektywną ocenę lekarza w tym obszarze [35].

Grzywański i wsp. w swym artykule opisują badanie, którego celem było porównanie skuteczności w wykrywaniu patologicznych szmerów auskultacyjnych przez algorytm SI oraz 5 lekarzy pediatrów. Wobec tego pozyskano zarejestrowane za pomocą dwóch elektronicznych stetoskopów: Littman 3200 i StethoMe 522 nagrania osłuchowe od 50 pacjentów pediatrycznych w wieku 1–18 lat, którzy podlegali hospitalizacji w Klinice Pulmonologii Dziecięcej Szpitala im. Karola Jonschera Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu. Wszystkie nagrania były analizowane poprzez dwóch niezależnych lekarzy. Jeżeli dochodziło do rozbieżności w ocenie nagrań, decydująca klasyfikacja ustalana była przez powołane do tego konsylium. Cały ten proces służył wyznaczeniu złotego standardu oznaczonego w artykule jako „GS” (ang. *golden standard*). Materiał analizowano pod kątem obecności świstów, rzężeń grubobańkowych, rzężeń drobnobańkowych oraz furczenia. W analizie uzyskanych wyników wykorzystano czułość, precyzję, swoistość oraz wartość F1-score, która jest średnią harmoniczną precyzji i czułości. Wartość ta pokazuje skuteczność rozpoznawania dźwięków. W tab. 2 zestawiono wyniki F1-score dla lekarzy i algorytmu sztucznej inteligencji

Tabela 2. Procentowa wartość F1-score dla lekarzy i algorytmu SI

Rodzaj dźwięku auskultacyjnego	Lekarze (%)	Algorytm sztucznej inteligencji (%)
Rzężenia grubobańkowe	42,8	47,1
Rzężenia drobnobańkowe	51,1	64,6
Świsty	61,8	66,4
Furczenia	61	72

porównywane z opracowanym złotym standardem, zaprezentowane w artykule w podziale na 4 typy patologicznych dźwięków auskultacyjnych. Dla każdego z przedstawionych dźwięków sztuczna inteligencja uzyskała wyższy wynik. Największą różnicę pomiędzy wynikiem uzyskanym przy użyciu algorytmu SI a tym otrzymanym przez lekarzy biorących udział w badaniu możemy zaobserwować w przypadku rzężeń drobnobańkowych, w przypadku których wartość uzyskana przez algorytm była o ponad 13 pkt procentowych wyższa. Uzyskane przez badaczy wyniki dają nadzieję na pozytywny wpływ sztucznej inteligencji na poprawę skuteczności diagnostyki osłuchowej [36].

Aby ocenić skuteczność algorytmu SI w analizie szmerów osłuchowych towarzyszących astmie, dr Hafke-Dys i wsp. przeprowadziło badanie, w ramach którego do analizy waldacyjnej włączono 1043 nagrania osłuchowe od pacjentów cierpiących na astmę i zdrowych, u których występowały lub nie występowały patologiczne szmery oddechowe. Nagrania te podzielono na 4 grupy:

1. AA (ang. *asthmatic with abnormal sounds*) – osoby chorujące na astmę, u których wykryto obecność patologicznych szmerów oddechowych.
2. AN (ang. *asthmatic no abnormal sounds*) – osoby chorujące na astmę, u których patologiczne szmery nie występują.
3. NA (ang. *non-asthmatic with abnormal sounds*) – osoby bez astmy, u których wykryto obecność patologicznych szmerów.
4. NN (ang. *non-asthmatic no abnormal sounds*) – osoby bez astmy i bez patologicznych szmerów oddechowych.

Nagrania dźwiękowe były rejestrowane za pomocą dwóch stetoskopów elektronicznych: Littman 3200 i StethoMe. Następnie dostępne nagrania przeanalizowano przy wykorzystaniu algorytmu sztucznej inteligencji StethoMe, którego zadaniem było wskazanie rodzaju dźwięku obecnego na nagraniu oraz częstotliwości jego występowania. Następnie wyniki uzyskane dzięki wykorzystaniu wspomnianego algorytmu porównywano przy użyciu analizy statystycznej z wcześniejszymi ocenami pochodzącymi z badań przeprowadzonych przez niezależnych lekarzy z zastosowaniem zaślepienia próby. Oceny uzyskane od lekarzy stanowiły punkt odniesienia nazywany w artykule prawdą wzorcową (ang. *ground truth*). Wyniki badania pokazały, że algorytm bardzo dobrze radzi sobie z wykrywaniem objawów astmy, w momencie gdy u pacjenta obecne są charakterystyczne dźwięki. Dlatego wydaje się zasadne wykorzystywanie go w monitorowaniu stanu zdrowia pacjentów cierpiących na astmę [12].

Typowa auskultacja opiera się w głównej mierze na wiedzy oraz doświadczeniu lekarza, który ją przeprowadza, wobec tego jest on podmiotem niezbędnym w tym procesie. Grzywański i wsp. w swoim badaniu postanowili stworzyć system, który pomoże osobom niezwiązanym z sektorem

ochrony zdrowia na samodzielne osłuchiwanie płuc. Celem tego badania było opracowanie inteligentnego systemu opartego na sztucznej inteligencji, który przy wsparciu danych z urządzenia i aplikacji StethoMe będzie podejmować decyzje diagnostyczne oraz prowadzić przez całe badanie. Proces ten miał przyspieszyć oraz uprościć badanie, ponieważ system sam miał decydować o tym, w jakim punkcie przyłożyć elektroniczny stetoskop oraz czy posiada już wystarczająco danych. W tym celu wykorzystano 570 nagrań osłuchowych od dzieci ze Szpitala Dziecięcego w Poznaniu, z których każde obejmowało 12 punktów osłuchowych. Następnie lekarze ocenili każde z tych badań na 3-stopniowej skali:

- 0 – brak zmian,
- 1 – niewielkie zmiany,
- 2 – poważne zmiany.

Na tej podstawie system uczył się rozpoznawania stanu pacjenta oraz decydowania, które z punktów osłuchowych są kluczowe w diagnozie. Z badania wynikało, że do podjęcia decyzji wystarczą średnio jedynie 3 punkty osłuchowe. Pomimo skrócenia czasu badania dokładność diagnozy utrzymywała się na podobnym poziomie, a system wybierał te same punkty osłuchowe, które przez lekarzy uważane są za najważniejsze [37].

PODSUMOWANIE

Odkrycie stetoskopu przez francuskiego lekarza René Laenneca w XIX wieku doprowadziło do tego, iż auskultacja płuc jest praktyką powszechnie stosowaną przez wielu lekarzy, a szczególnie internistów i lekarzy rodzinnych. Obecnie dostęp do różnego rodzaju stetoskopów jest nierówny. Jednak

ze względu na kluczowy udział subiektywnej oceny lekarza przeprowadzającego badanie osłuchowe wyniki są rozbieżne w ocenie. Według badań przeprowadzonych przez Hafke-Dys i wsp. odsetek prawidłowych rozpoznaw zjawisk osłuchowych waha się od 24,1 do 36,5%, przy czym najlepszą skuteczność uzyskali lekarze pulmonolodzy, a najmniejszą – studenci [13, 37].

Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił na zebranie i usystematyzowanie informacji na temat StethoMe. Ukazał zbadane obszary oraz wyniki przeprowadzonych badań (tab. 3).

Algorytm sztucznej inteligencji zintegrowany z elektronicznym stetoskopem StethoMe jest narzędziem, które osiąga wysoką skuteczność w procesie rozpoznawania i klasyfikacji patologicznych szmerów oddechowych. Bardzo dobrze radzi sobie z odpowiednią analizą ich natężeń. Grzywalski i wsp. w swym badaniu osiągnęli wyższe wyniki w zakresie wszystkich wskazanych rodzajów szmerów w porównaniu do lekarzy biorących udział we wskazanym badaniu [36].

Małe dzieci są grupą osób, u których diagnostyka oraz kontrola chorób takich jak astma jest szczególnie problematyczna ze względu na fakt, iż niemożliwe jest przeprowadzenie np. spirometrii, co jest powszechną praktyką u pacjentów dorosłych. StethoMe jest urządzeniem, które wspiera proces diagnostyki zaostrzeń astmy; jego zastosowanie jest szczególnie łatwe u pacjentów pediatrycznych, ponieważ nie wymaga ono wizyty stacjonarnej u lekarza specjalisty. Tym samym urządzenie to pozwala na redukcję wizyt stacjonarnych, co skutkuje odciążeniem sektora ochrony zdrowia [34].

Ważne jest kontynuowanie badań dotyczących wykorzystania elektronicznego stetoskopu wspomaganego sztuczną inteligencją StethoMe. Może mieć to pozytywny wpływ na przebieg i dostęp do diagnostyki osłuchowej oraz wspomóc

Tabela 3. Zestawienie wyników przeprowadzonego przeglądu piśmiennictwa

Autorzy	Artykuł	Badani	Wiek	Metody	Wyniki
Emeryk i wsp.	<i>Home...</i> [34]	149 pacjentów z astmą	52 pacjentów w wieku 0–5 lat 38 pacjentów w wieku 6–17 lat 59 pacjentów dorosłych	6-miesięczne badanie obserwacyjne Pacjenci wykonywali badanie codziennie przez okres 2 tygodni, potem raz w tygodniu (częściej przy zaostrzeniach)	Stetoskop z algorytmem SI skutecznie wykrywa zaostrzenia astmy
Hafke i wsp.	<i>The accuracy...</i> [13]	185 uczestników (lekarze różnych specjalizacji i studenci medycyny)	–	Ankieta online, test klasyfikacji dźwięków, porównanie odpowiedzi z opracowanym standardem	Pulmonolodzy osiągnęli najlepsze wyniki; duże różnice w interpretacji patologicznych szmerów oddechowych; SI może pomóc w diagnostyce osłuchowej
Kevat i wsp.	<i>Artificial intelligence</i> [35]	25 dzieci łącznie 192 nagrania osłuchowe	Mediana wieku pacjentów 6,7 lat	Analiza nagrań przy użyciu algorytmu SI StethoMe i porównanie wyników z oceną lekarzy	Algorytm SI StethoMe skutecznie wykrywa patologiczne szmery oddechowe pozyskane przy użyciu różnych stetoskopów elektronicznych
Grzywalski T. i wsp.	<i>Practical implementation of artificial intelligence algorithms</i> [36]	50 pacjentów pediatrycznych (522 nagrania osłuchowe)	1–18 lat	Porównanie wyników uzyskanych przy użyciu algorytmu SI z wynikami lekarzy, pomiar wartości: czułości, precyzji, swoistości i wartości F1-score	Algorytm SI osiągał lepsze wyniki od lekarzy w rozpoznawaniu wszystkich rodzajów szmerów osłuchowych
Hafke-Dys H. i wsp.	<i>Artificial Intelligence Approach to the Monitoring</i> [12]	899 pacjentów (1043 nagrania osłuchowe)	–	Porównanie przy użyciu analizy statystycznej wyników uzyskanych przez algorytm SI i lekarzy	SI osiągnęła wysoką skuteczność w rozróżnianiu patologicznych szmerów oddechowych lub ich braku u pacjentów z astmą
Grzywalski T.	<i>Interactive Lungs Auscultation with Reinforcement Learning Agent</i> [37]	570 nagrań osłuchowych	Niemowlęta 0–1 rok – 13%, dzieci 1–6 lat – 40%, dzieci 6–18 lat – 43% uczestników	Stworzenie systemu, który wspomaga pacjentów w łatwym i szybkim badaniu, bazując na ocenie lekarzy	Algorytm SI potrafił przeprowadzić badanie osłuchowe, używając do tego średnio tylko 3 punktów osłuchowych

zdałą opiekę nad pacjentem i kontrolę wielu chorób, w których tak ważne jest wczesne wykrywanie zaostrzeń i odpowiednio szybka interwencja.

WNIOSKI

1. Wykorzystanie algorytmów SI wydaje się szczególnie zasadne u pacjentów cierpiących na astmę, u których konieczne jest częste monitorowanie stanu zdrowia oraz wczesne wykrywanie zaostrzenia objawów osłuchowych.
2. Stosowanie urządzeń takich jak StethoMe może wpłynąć pozytywnie na rozwój telemedycyny i wspomóc zdalną opiekę nad pacjentem, a tym samym zminimalizować konieczność wizyt stacjonarnych u lekarza.
3. W przeprowadzonym przeglądzie piśmiennictwa nie wykazano, aby StethoMe było wykorzystywane do wykrywania zaostrzeń w przewlekłych chorobach układu oddechowego skorelowanych z zanieczyszczeniami powietrza.

PIŚMIENNICTWO

1. Ścibor M. Alergie jako problem zdrowia publicznego. In: Golinowska S, Czepiel J, Domagała A, et al., editors. *Zdrowie publiczne: wymiar społeczny i ekologiczny*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar; 2022. p. 673–688.
2. Krzeszowiak J, Pawlas K. Pył zawieszony (PM_{2.5} oraz PM₁₀), właściwości oraz znaczenie epidemiologiczne ekspozycji krótko i długookresowej dla chorób układu oddechowego oraz krążenia. *Med Srod*. 2018;21(2):7–13.
3. World Health Organization. *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment*. Chapter 2: Air pollution. Geneva (CH): WHO; 2021.
4. World Health Organization. Sustainable Development Goal indicator 3.9.1: mortality attributed to air pollution. Geneva: World Health Organization; 2024.
5. European Environment Agency. *Air quality in Europe — 2017 report*. Copenhagen (DK): European Environment Agency; 2017.
6. European Commission. *Premature deaths due to exposure to fine particulate matter (PM_{2.5})*. Luxembourg: European Commission; 2025. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_11_52/default/table?lang=en (dostęp: 2025.02.20).
7. Ścibor M, Balcerzak B, Galbarczyk A, Jasienska G. Quality of life of patients with bronchial asthma exposed to gaseous air pollution in the place of residence. *Sustain Cities Soc*. 2021;64:102541. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102541>
8. Ścibor M, Balcerzak B, Galbarczyk A, et al. Associations between daily ambient air pollution and pulmonary function, asthma symptom occurrence, and quick-relief inhaler use among asthma patients. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(8):4852. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084852>
9. Ścibor M, Malinowska-Cieślak M. The association of exposure to PM₁₀ with the quality of life in adult asthma patients. *Int J Occup Med Environ Health*. 2020;33(3):311–324. <https://doi.org/10.13075/ijomh.1896.01527>
10. Ścibor M, Galbarczyk A, Jasienska G. Living well with pollution? The impact of the concentration of PM_{2.5} on the quality of life of patients with asthma. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(14):2502. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142502>
11. Patrzyk S, Woźniacka A. *Sztuczna inteligencja w medycynie*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Medycznego w Łodzi; 2022. p. 11–15.
12. Hafke-Dys H, Kuźnar-Kamińska B, Grzywalski T, et al. Artificial Intelligence approach to the monitoring of respiratory sounds in asthmatic patients. *Front Physiol*. 2021;12:745635. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.745635>
13. Hafke-Dys H, Bręborowicz A, Kleka P, et al. The accuracy of lung auscultation in the practice of physicians and medical students. *PLoS One*. 2019;14(8):e0220606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220606>
14. StethoMe sp. z o.o. Dla profesjonalistów. Poznań: StethoMe; [Internet]. 2025. <https://www.stethome.com/pl/dla-profesjonalistow> (access: 2025.04.24)
15. Szoltysek J, Trzpiot G. *Zagrożona przyszłość miast – aspekty środowiskowe i demograficzne*. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach; 2023. p. 30–36.
16. Jędrak J, Badyda AJ, Konduracka E, et al. *Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie*. Warszawa: Polski Alarm Smogowy, Krakowski Alarm Smogowy, Warszawa Bez Smogu, Instytut Chemii Fizycznej PAN; 2021. p. 19–25.
17. Latkowski JB. *Otorynolaryngologia: podręcznik dla studentów i specjalizujących się lekarzy*. 1^a ed. Warszawa: PZWL Wydawnictwo Lekarskie; 2017. p. 40–47.
18. Całka M, Pawlica PJ. Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczenia powietrza. *J Life Med Sci*. 2020;1:13–18.
19. Gładka A, Zatoński T. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na choroby układu oddechowego. *Kosmos*. 2016;61(4):573–582.
20. Całka M, Pawlica PJ. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na płodność. *Nauki Przyrodnicze Medyczne*. 2019;13:3–11.
21. Ramanathan G, Gajalakshmi R, Biswas S, et al. Effects of urban fine particulate matter and ozone on HDL functionality. *Part Fibre Toxicol*. 2015;13:1–11. <https://doi.org/10.1186/s12989-015-0108-z>
22. Gluszek J, Kosicka TM. Wpływ smogu (zanieczyszczonego powietrza) na choroby układu sercowo-naczyniowego. *Chor Serce Naczyn*. 2019;16(3):201–206. <https://doi.org/10.5603/ChSiN.2019.0030>
23. Balcerzak B, Hałuszka J. Jakość powietrza, wody i gleby i zdrowie. In: Golinowska S, Czepiel J, Domagała A, et al., editors. *Zdrowie publiczne: wymiar społeczny i ekologiczny*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar; 2022. p. 511–519.
24. Kucęba R, Kulej-Dudek E. Zarządzanie niską emisją – społecznościowa platforma transferu wiedzy. *Zesz Nauk Politech Śl*. 2016;93:310–320.
25. Ministerstwo Rozwoju. *Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju – implementacja w Polsce*. Warszawa: Ministerstwo Rozwoju; 2025. https://www.un.org.pl/files/170/Agenda2030PL_pl-5.pdf (access: 2025.03.01).
26. Krupowicz J. Zanieczyszczenie powietrza pyłami i umieralność w wybranych miastach Polski. *Konwersatorium Wiedzy o Mieście*. 2024;9:53–62. <https://doi.org/10.18778/2543-9421.09.01>
27. Płoch EA. O pojęciu sztucznej inteligencji i możliwościach jej zastosowania w postępowaniu cywilnym. *Prawo Dział*. 2020;(44):273–280.
28. *Sztuczna inteligencja*. Słownik języka polskiego PWN. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. <https://sjp.pwn.pl/sjp/sztuczna-inteligencja;2466532.html> (access: 2025.04.22).
29. Stone P, Brooks R, Brynjolfsson E, et al. *Artificial Intelligence and Life in 2030: One Hundred Year Study on Artificial Intelligence*. Report of the 2015–2016 Study Panel. Stanford University; 2016.
30. Karski K. Wybrane zastosowania sztucznej inteligencji w medycynie. *Manag Qual*. 2022;4(4):204–213.
31. Shah SB. Artificial Intelligence (AI) for Brain Tumor Detection: Automating MRI Image Analysis for Enhanced Accuracy. *Int J Curr Eng Technol*. 2024;14(5)
32. Rajpurkar P, Irvin J, Zhu K, et al. CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning. *arXiv preprint arXiv:1711.05225v3 [cs.CV]*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05225>
33. StethoMe sp. z o.o. Instrukcja obsługi. Elektroniczny stetoskop z dedykowaną aplikacją. Wersja wyrobu medycznego: StethoMe® 2.3.x oraz StethoMe® AI 3.3.x. Poznań: StethoMe; [Internet]. <https://www.stethome.com> (access: 2025.04.24).
34. Emeryk A, Derom E, Janeczek K, et al. Home monitoring of asthma exacerbations in children and adults with use of an AI-aided stethoscope. *Ann Fam Med*. 2023;21(6):517–525. <https://doi.org/10.1370/afm.3039>
35. Kevat A, Kalirajah A, Roseby R. Artificial intelligence accuracy in detecting pathological breath sounds in children using digital stethoscopes. *Respir Res*. 2020;21(1):253. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01523-9>
36. Grzywalski T, Piecuch M, Szajek M, et al. Practical implementation of artificial intelligence algorithms in pulmonary auscultation examination. *Eur J Pediatr*. 2019;178(6):883–90. <https://doi.org/10.1007/s00431-019-03363-2>
37. Grzywalski T, Belluzzo R, Drgas S, et al. Interactive Lungs Auscultation with Reinforcement Learning Agent. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11238>