



Nowe trendy i rozwój technologii w okulistyce klinicznej – przegląd piśmiennictwa

New trends in ophthalmology – a literature review

Maciej Kamiński^{1,A-F}, Olga Adamska^{2,A-F}, Mateusz Jankowski^{3,A,E-F}, Agnieszka Kamińska^{2,A,C,E-F}

¹ Uczelnia Łazarskiego, Wydział Medyczny, Polska

² Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Wydział Medyczny-Collegium Medicum, Katedra Okulistyki, Polska

³ Centrum Medyczne Kształcenia Podyplomowego, Szkoła Zdrowia Publicznego, Zakład Zdrowia Populacyjnego, 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

Kamiński M, Adamska O, Jankowski M, Kamińska A. Nowe trendy i rozwój technologii w okulistyce klinicznej – przegląd piśmiennictwa. Med Og Nauk Zdr. 2024; 30(1): 34–40. doi: 10.26444/monz/185980

Streszczenie

Wprowadzenie i cel pracy. XXI wiek skłania do wdrażania nowatorskich rozwiązań w celu uzyskania bardziej pomyślnych wyników pracy. Sztuczna inteligencja, internet rzeczy, roboty itp. wkraczają do medycyny, aby wspierać proces diagnostyczno-terapeutyczny pacjenta. Celem artykułu jest przedstawienie zastosowania nowych technik w dziedzinie diagnostyki i leczenia w okulistyce klinicznej.

Metody przeglądu. Dokonano przeglądu baz danych PubMed/Medline i Google Scholar celem identyfikacji publikacji dotyczących zastosowania nowych technologii w okulistyce klinicznej. Analizie poddano publikacje w języku angielskim i polskim opublikowane w latach 2012–2023. Zastosowano kombinację następujących słów kluczowych: „telemedycyna”, „okulistyka”, „teleokulistyka”, „badania przesiewowe w kierunku retinopatii cukrzycowej”, „sztuczna inteligencja”, „sztuczna inteligencja w okulistyce”.

Opis stanu wiedzy. Spośród 152 znalezionych publikacji 28 włączono do przeglądu. Nowe technologie stosowano głównie w postępowaniu klinicznym u pacjentów z rozpoznaniem retinopatii wcześniaków, retinopatii cukrzycowej, jaskry, zwyrodnienia plamki związanego z wiekiem i zaćmy. Wdrożone rozwiązania bazowały na technologiach z zakresu: sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego, analizy dużych zbiorów danych, internetu rzeczy, zdalnego monitorowania pacjentów, telediagnostyki i chirurgii robotycznej, a pozwalały leczyć retinopatię, jaskrę, zwyrodnienie plamki związane z wiekiem i zaćmę.

Podsumowanie. Zastosowanie nowych technik stwarza szerokie perspektywy rozwoju usług świadczonych przez okulistów i lepsze wykorzystanie kadr medycznych. Wdrożenie nowych cyfrowych technologii pozwala zmniejszyć czas oczekiwania na świadczenia i zapewnić dostęp do opieki okulistycznej większej liczbie pacjentów.

Słowa kluczowe

nowe technologie, telemedycyna, innowacje, okulistyka

Abstract

Introduction and Objective. The 21st century stimulates to bring novel solutions to initiate more effective results. Artificial intelligence, the Internet of Things, robots, etc. are a part of medicine that relieves physicians at work and supports the patient's diagnostic-therapeutic process. The article aims to present the use of new techniques in the field of diagnostics and treatment in clinical ophthalmology.

Review methods. The PubMed/Medline and Google Scholar databases were reviewed to identify publications on the use of new technologies in clinical ophthalmology. The analysis included publications in English and Polish published in 2012–2023. A combination of the following keywords was used: 'telemedicine', 'ophthalmology', 'teleophthalmology', 'screening for diabetic retinopathy', 'artificial intelligence', and 'artificial intelligence in ophthalmology'.

Brief description of the state of knowledge. From a total of 152 articles identified, 28 were included in the review. New technologies were mainly used in the clinical management of patients diagnosed with retinopathy of prematurity, diabetic retinopathy, glaucoma, age-related macular degeneration, and cataracts. The implemented solutions were based on technologies in the field of artificial intelligence, machine learning, analysis of large data sets, Internet of Things, remote patient monitoring, telediagnosics, and robotic surgery. The implementation concerned the treatment of retinopathy, glaucoma, age-related macular degeneration, and cataracts.

Summary. The use of new techniques creates broad prospects for the development of services provided by ophthalmologists and better allocation of medical staff. The implementation of new digital technologies allows the reduction of waiting time for services and provide access to ophthalmological care to more patients.

Key words

telemedicine, new technologies, ophthalmology, innovations

✉ Autor do korespondencji: Olga Adamska, Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Wydział Medyczny – Collegium Medicum, Zakład Okulistyki, Warszawa, Polska
E-mail: o.adamska@uksw.edu.pl

Nadesłano: 9.01.2024; zaakceptowano do publikacji: 12.03.2024; publikacja online: 22.01.2024

WPROWADZENIE I CEL PRACY

W ostatniej dekadzie nastąpiła dynamiczna cyfryzacja medycyny. Pandemia COVID-19 przyspieszyła proces wdrażania technologii informacyjno-komunikacyjnych w placówkach ochrony zdrowia [1]. Wdrożenie technologii cyfrowych i telekomunikacyjnych stworzyło bezprecedensową możliwość tworzenia nowych modeli opieki nad pacjentami. Wykorzystanie rozwiązań cyfrowych i telemedycyny może prowadzić do zwiększenia efektywności procesu opieki nad pacjentem [1, 2]. Innowacje cyfrowe, które już zagościły w medycynie, obejmują sztuczną inteligencję (ang. *artificial intelligence* – AI), telekomunikacyjne sieci piątej generacji (5G), internet rzeczy (IoT) oraz robotykę, tworząc system zależny od siebie elementów. Nowoczesne technologie są wdrażane w różnych dziedzinach medycyny. Rozwój technologii cyfrowych wymaga współpracy interdyscyplinarnej m.in. przedstawicieli zawodów medycznych, inżynierów i osób posiadających kompetencje techniczne, a także pacjentów. Technologie cyfrowe i telekomunikacyjne oferują możliwość rozwoju i wypracowania nowych modeli opieki nad pacjentem w wielu dziedzinach medycyny, w tym w okulistyce [3, 4]. Telemedycyna może znajdować szczególnie ważne zastosowanie w opiece nad pacjentami dotkniętymi nierównościami w zdrowiu i wykluczeniem komunikacyjnym. Wczesna diagnostyka chorób oczu ma istotne znaczenie dla wdrożenia leczenia i zapobiegania utracie wzroku [2]. Dane naukowe na temat aktualnych trendów w zakresie rozwoju technologii cyfrowych wdrażanych w opiece okulistycznej oraz dostępnych rozwiązań technologicznych mogą przyczynić się do lepszego poznania potencjału cyfrowych narzędzi w okulistyce i procesu badawczo-rozwojowego sprzyjającego wdrażaniu nowych technologii. Celem artykułu była charakterystyka technologii informacyjno-komunikacyjnych stosowanych w diagnostyce i leczeniu najczęściej występujących chorób oczu, w tym retinopatii cukrzycowej, retinopatii wcześniaków, zwyrodnienia plamki żółtej związanej z wiekiem, jaskry, zaćmy i innych zaburzeń przedniego odcinka oka. Przegląd podsumowuje strategie cyfrowe oraz technologie, które zostały opracowane w celu poprawy opieki nad pacjentem okulistycznym.

METODY PRZEGLĄDU

Dokonano przeglądu baz danych PubMed/Medline i Google Scholar celem identyfikacji publikacji dotyczących zastosowania nowych technologii w okulistyce klinicznej. Analizie poddano publikacje w języku angielskim i polskim opublikowane w latach 2012–2023. Z analizy wyłączono opisy przypadków bądź serii przypadków oraz publikacje odnoszące się do świadczeń opieki zdrowotnej innych niż wchodzące w zakres świadczeń okulistycznych. Zastosowano kombinację następujących słów kluczowych związanych z używaniem nowoczesnych technologii w okulistyce: „telemedicine”, „tele-ophthalmology”, „tele-screening”, „diabetic retinopathy screening”, „artificial intelligence”, „deep learning”, „digital transformation”, „digital innovations”, „artificial intelligence in ophthalmology”, „AMD”, „glaucoma”, „retinopathy”, „cataract”. Początkowo zidentyfikowano 152 publikacje, których abstrakty zostały przeanalizowane pod względem zgodności z celami artykułu. Po analizie abstraktów do przeglądu włączono 28 prac pełnotekstowych.

OPIS STANU WIEDZY

Począwszy od roku 2020 różne sektory gospodarki, w tym sektor medyczny, zaczęły używać w codziennej praktyce przełomowych cyfrowych narzędzi [5]. Wynalezienie i zastosowanie cyfrowych innowacji, takich jak zdalne konsultacje medyczne, bezprzewodowa sieć 5G, AI, czat GTP, czy internet rzeczy (ang. *internet of things*), zapisały się na kartach historii jako przełomowe zmiany nowej epoki [6].

Zastosowanie technologii cyfrowych w medycynie było owocem postępu cywilizacyjnego [7]. Pandemia COVID-19 przyspieszyła proces wdrażania technologii cyfrowych do praktyki klinicznej [7]. Ogłoszenie 11 marca 2020 roku przez Światową Organizację Zdrowia (ang. World Health Organization – WHO), iż COVID-19 jest pandemią, spowodowało zwiększenie nacisku na zastosowanie telemedycyny i rozwiązań cyfrowych w opiece nad pacjentami [7]. Wprowadzenie teleopieki pozwoliło na zmniejszenie ryzyka rozprzestrzeniania się zakażeń [7]. W artykule przedstawiono przegląd różnych modeli wdrożenia technologii informacyjno-komunikacyjnych, w tym porad telemedycznych i sztucznej inteligencji, które znajdują zastosowanie w świadczeniu usług okulistycznych (ze szczególnym uwzględnieniem cywilizacyjnych chorób oczu). Omówiono również trendy wdrożeniowe nowych technologii w okulistyce klinicznej, raportowane przez różne ośrodki naukowe na całym świecie.

Rola nowych technologii i rozwiązań cyfrowych w okulistyce

W 2019 roku WHO rozpoczęła prace nad kryteriami wdrożenia cyfrowych rozwiązań do opieki nad pacjentami [8]. Kryteria te kładą szczególny nacisk na ocenę ich zysków, strat, dopasowania do pacjentów i zapewnienia bezpieczeństwa informacji na temat chorych [8]. W kontekście zastosowania rozwiązań cyfrowych szczególną rolę przypisuje się kontaktom pacjenta z placówką medyczną m.in. w celu uzupełniania informacji i monitorowania przebiegu choroby oraz oferowania badań. Ponadto zadaniem wdrażania nowych technologii jest wsparcie lekarzy w podejmowaniu decyzji, umożliwiają one także cyfrowe śledzenie informacji zdrowotnych i edukację pacjentów. Z uwagi jednak na wrażliwość wykorzystywanych danych konieczna jest wielowymiarowa kontrola tych narzędzi pod kątem spełnienia standardów bezpieczeństwa [8].

Telemedycyna (w tym telekonsultacja) umożliwia realizację świadczeń opieki zdrowotnej w czasie rzeczywistym, zdalnie oraz niwelując wykluczenie komunikacyjne i konieczność transportu do placówki medycznej [9]. Integracja innowacyjnego projektowania usług, takiego jak wykorzystanie smartfonów podłączonych do lamp szczelinowych do wizualizacji biomikroskopowej oka, pokazuje potencjał wykorzystania technologii do usprawnienia konsultacji medycznych. Dzięki temu okuliści mogą wykonywać badanie pacjenta w czasie rzeczywistym i na podstawie klinicznego obrazu podejmować bardziej świadome decyzje [10].

Połączenie wideokonsultacji i zaawansowanej technologii tworzy niepowtarzalną szansę dla pacjentów na otrzymanie porady medycznej [11]. Zastosowanie takich rozwiązań w ramach normy bądź w coraz większym zakresie rewolucjonizuje dostarczanie usług okulistycznych. Powyższe działanie pozwala na zwiększenie dostępności świadczeń okulistycznych i zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów. Telediagnostykę w okulistyce wprowadzono w 2020

roku w Szkocji, głównie ze względu na ograniczenie śladu węglowego i ochronę środowiska poprzez brak konieczności transportu do placówki [12].

W literaturze naukowej przedstawiano również możliwość zastosowania smartfonów i łącza internetowego do prowadzenia rejestru danych badania okulistycznego. Ittoop i wsp. analizowali możliwość używania narzędzi użytku domowego do 24-godzinnego pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego [13]. Anderson i wsp. w swoim badaniu postawili hipotezę, że wykorzystanie domowego monitorowania wzroku ma prowadzić do wcześniejszego wykrywania ostrego zamknięcia kąta przesączenia i depriwacji pola widzenia u pacjentów chorujących na jaskrę [14]. Wisse i wsp. w swoim przeglądzie poruszyli problem poprawności danych mierzonych za pomocą internetowych narzędzi do kontroli ostrości wzroku i refrakcji [15]. Zastosowanie narzędzi internetowych okazało się bezpieczną alternatywą, nieustępującą pod względem efektywności tradycyjnej metodzie badania ostrości wzroku i refrakcji [13–15].

W 2018 roku Abramoff i wsp. przeprowadzili eksperyment, który dotyczył zastosowania systemu AI do wykrywania retinopatii cukrzycowej (ang. *diabetic retinopathy* – DR) u osób z cukrzycą [16]. Zarejestrowano 900 uczestników bez historii DR w przychodniach podstawowej opieki zdrowotnej, porównując dane z wideofotografii stereoskopowej i optycznej koherentnej tomografii siatkówki (OCT) w ramach Wisconsin Fundus Photograph Reading Center (FPRC), wykonywanych przez fotografów z certyfikatami FPRC. Oceniano również stopień zaawansowania retinopatii cukrzycowej zgodnie ze skalą ETDRS (Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Severity Scale) oraz obrzęk plamki żółtej związany z cukrzycą (ang. *diabetic macular edema* – DME).

Dzięki zastosowaniu AI ten system ma potencjał do zwiększenia wydajności i precyzji diagnozowania oraz monitorowania retinopatii cukrzycowej. Algorytmy AI pozwalają na analizę dużej ilości danych oraz jednoczesową identyfikację wczesnych objawów DR, co umożliwia szybką interwencję i leczenie. Może to znacząco poprawić wyniki leczenia pacjentów i zmniejszyć obciążenie personelu medycznego [16].

Sztuczna inteligencja i technologie cyfrowe w diagnostyce chorób oczu

Dotychczas stosowane metody diagnostyczne chorób oczu opierają się klasycznie na ocenie klinicznej pacjentów w gabinetach wyposażonych w urządzenia umożliwiające wykonywanie pomiarów. Innowacyjne uwarunkowania, które cieszą się coraz większą popularnością, umożliwiają przechwytywanie obrazów oka różnych modalności. Proces ich wdrożenia do praktyki klinicznej jest kosztowny i czasochłonny. Niemniej jednak okulistyka to dziedzina medycyny szczególnie dobrze przygotowana do zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji i technik uczenia maszynowego [3, 4, 8]. Wykorzystywanie uczenia maszynowego do analizy obrazów narządu wzroku, takich jak cyfrowe zdjęcia dna oka i pola widzenia, pozwala na zautomatyzowane przesiewowe badanie i diagnozowanie takich chorób oczu jak retinopatia cukrzycowa [16], zaćma [17–19], zwyrodnienie plamki związane z wiekiem (AMD) [20] czy retinopatia wcześniacza [21]. Wdrożenie rozwiązań z zakresu sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego ma szansę zrewolucjonizować podejście do diagnostyki i leczenia w okulistyce, chociaż stosunek ich kosztów do efektywności pozostaje niezbadany [22].

Wirtualna rzeczywistość i wsparcie pacjentów z chorobami oczu

Sieci telekomunikacyjne oparte na 5G (standard sieci komórkowej i przesyłania danych), a w przyszłości 6G, napędzają mechanizm wirtualnej rzeczywistości (ang. *virtual reality* – VR). Okulary do odtwarzania VR, w których prezentowany jest obraz wygenerowany za pomocą grafiki komputerowej, umożliwiają interakcję odbiorcy z symulowanymi elementami w sposób pozornie realistyczny [19–21]. Narzędzie to stanowiło prototyp i inspirację do utworzenia przyrządów, służących wsparciu pacjentów z chorobami oczu. Urządzenia VR, takie jak IrisVision™ i NuEyes™, są już wykorzystane do pomocy pacjentom z zaburzeniami wzroku [23]. Zestaw VR IrisVision™ składa się z okularów, w których umieszczony jest smartfon. Taki zestaw umożliwia nagrywanie otoczenia pacjenta i wyświetlanie obrazu w polu widzenia obwodowego w skali od 1:1 do 5:1. NuEyes™ zaś wykorzystuje technologię VR wyłącznie do powiększania obrazów. Głównym ograniczeniem użycia VR przez pacjentów jest czas potrzebny do przetworzenia danych w urządzeniu, ograniczenie pola widzenia oraz konieczność używania wraz z okularami zestawu słuchawkowego, by móc odbierać bodźce zewnętrzne. Użytkownik posiada zatem pole widzenia znacznie zawężone w porównaniu z fizjologicznym, a odbiór otoczenia różni się od doznań zmysłowych człowieka oraz postrzegana rzeczywistość wolniej ulega percepcji [23].

Amerykańska Agencja Żywności i Leków (ang. Food and Drug Administration – FDA) zatwierdziła do użytku domowego ponadto kilka urządzeń służących wczesnemu wykrywaniu AMD, takich jak: ForeseeHome Notal Vision [24], myVisiontrack® Genentech [25], Alleye, Oculare Medical [26]. Pomagają one w funkcjonowaniu pacjentowi z zaburzeniami widzenia, służąc jednocześnie do monitorowania postępu choroby. Technologie te kontrolują pole widzenia pacjenta za pomocą procesu nadostrości, dzięki któremu ludzki układ wzrokowy jest w stanie dostrzec nawet najdrobniejsze różnice we względnej lokalizacji dwóch obiektów w przestrzeni. Neowaskularyzacja naczyńiówkowa, charakterystyczna dla AMD, powoduje subtelne oddzielenie warstw siatkówki, co przekłada się na powstanie metamorfopsji i mroczków i daje efekt w postaci upośledzenia widzenia. Urządzenia wykrywają zniekształcenia obrazów o różnej wielkości. Pozwala to na stworzenie ilościowej mapy pola widzenia pacjenta, metamorfopsję dla każdego oka i wykrywanie podłużnych zmian na mapach oraz odchyień od normy [24–26].

Rozwiązania cyfrowe wspierające operacje okulistyczne

Zabiegi chirurgiczne stanowią istotną część pracy okulistów. Producenci technologii lekowych i wyrobów stosowanych w okulistyce stworzyli cyfrowe zestawy umieszczane wokół głowy, które umożliwiają poprawę ergonomii pracy przy stole operacyjnym oraz zapewniają wizualizację pola operacyjnego dzięki użyciu okularów 3D [27], których obraz widnieje na ekranie umieszczonym obok pacjenta. Ma to za zadanie niwelowanie uszczerbku na zdrowiu, na jaki narażeni są chirurdzy okuliści ze względu na długotrwałe, niekorzystne ustawienie krzywej kręgosłupa podczas operacji, oraz poprawę wizualizacji pola operacyjnego. Następne dwa systemy, Beyonics™ and ORlenz™ AR, stworzone w celu poprawy komfortu i jakości ich pracy, wykorzystują podobny mechanizm i umożliwiają obserwację pola operacyjnego na monitorze ustawionym przed chirurgiem bez konieczności

utrzymywania przez niego wymuszonej postawy, związanej z użyciem okularu mikroskopu [26, 27].

Zdalna diagnostyka (telediagnostyka) retinopatii

Światowa Organizacja Zdrowia (World Health Organization – WHO) w swoich raportach podaje, że co najmniej 2,2 mld ludzi na całym świecie cierpi z powodu chorób oczu, które determinują zaburzenia wzroku [28]. Ograniczenia w dostępności i jakości opieki okulistycznej to istotne czynniki, które wpływają na diagnostykę i leczenie chorób oczu [28, 29].

Zastosowanie zdalnej diagnostyki w okulistyce umożliwia ograniczenie lub wyeliminowanie barier organizacyjnych utrudniających efektywne wdrażanie opieki okulistycznej w krajach rozwijających się i średnio rozwiniętych [30]. Koncepcja wprowadzania cyfrowych rozwiązań celem zapewnienia szybkich konsultacji może być zrealizowana na wiele sposobów. Jednym z coraz częściej wykorzystywanych rozwiązań jest zapewnienie pacjentowi konsultacji ze specjalistą poprzez połączenie video [28, 31]. Może on wówczas uzyskać informacje i zalecenia terapeutyczne od lekarza w czasie rzeczywistym, bez konieczności opuszczenia miejsca zamieszkania [30]. Kolejnym przykładem jest metoda odroczonego przeglądu obrazowania dna oka pacjenta. Profesjonalista medyczny bądź algorytm sztucznej inteligencji, pracując zdalnie, ma szansę w ten sposób przeanalizować i ocenić stan pacjentów uczestniczących w badaniach przesiewowych. Pozwala to na ograniczenie czasu i kosztów organizacji wizyt pojedynczych pacjentów [30]. Następnym rozwiązaniem sprzyjającym zapewnieniu dostępu do opieki specjalistycznej jest korzystanie z usług wirtualnego tłumacza języka w celu zniwelowania barier językowych i – do pewnego stopnia – kulturowych między świadczeniczką a pacjentem [28].

Telemedycyna jest również używana do zdalnej edukacji (teleedukacji) pacjentów. Oznacza to rozwój internetowych platform edukacyjnych, blogów i newsletterów, służących propagowaniu metod zapobiegania chorobom oczu oraz budowania wiedzy i świadomości pacjentów [31].

WHO podkreśla rolę badania dna oka w profilaktyce chorób cywilizacyjnych oczu. Kraje takie jak Wielka Brytania czy Singapur w profilaktyce retinopatii cukrzycowej już zastosowały algorytmy cyfrowych schematów programowania i oceny prawidłowości struktur widzianych w lampie świetlnej, pośredniej oftalmoskopii i soczewce Volka, na które pozwalają rozwiązania telediagnostyki [32, 33]. W badaniach porównano efektywność oceny siatkówki z wykorzystaniem telediagnostyki z oceną przeprowadzoną przez ekspertów. Badanie ukazało, że skuteczność obu metod jest porównywalna, przy czym ocena z zastosowaniem AI wykazywała większą efektywność w aspekcie czasu analizy jednego badania [32, 33].

Badania zdalne i telediagnostyka ułatwiają dzielenie się zadaniami i delegowanie ich przez lekarzy na innych pracowników placówki medycznej. Poza tym metody te oferują szybkie i dokładne rozwiązania w zakresie badań przesiewowych chorób cywilizacyjnych oczu, nawet (w wybranych przypadkach) bez obecności lekarza specjalisty okulistyki [34].

Wysoki potencjał rozwoju mają algorytmy badań przesiewowych oparte na sztucznej inteligencji, w tym algorytmy wykorzystujące obrazowanie siatkówki w smartfonie [34, 35]. Kompleksowe i praktyczne wytyczne do stosowania rozwiązań telemedycznych w diagnostyce retinopatii cukrzycowej zostały niedawno zaktualizowane przez grono

ekspertów ds. okulistyki Amerykańskiego Stowarzyszenia Teledycyny [35].

W ciągu ostatniej dekady systemy obrazowania cyfrowego o szerokim polu widzenia zostały zmodyfikowane w celu oceny pacjentów pediatrycznych z retinopatią wcześniaczą [36]. Technologie obrazowania umożliwiają ponadto dokumentowanie wyników badań siatkówki i mogą potencjalnie ustanowić bazę danych, pozwalającą monitorować proces terapeutyczny. Już w roku 2000 pomyślnie przetestowano system telemedycyny typu „zapisz i przekaż”, służący do przesiewowego badania wzroku. Wówczas pielęgniarki odpowiednio przygotowane do wykonania badań przesyłały wygenerowane przez pacjentów obrazy do specjalistów okulistyki [37]. Od tego czasu telemedycyna w retinopatii wcześniaczej została szczegółowo oceniona pod kątem dokładności i wiarygodności diagnostycznej, której badania wykazały korzystne wyniki z czułością od 0,46 do 0,86 i swoistością od 0,86 do 1,00 [37, 38]. Wyniki zaangażowania pracowników innych zawodów medycznych w diagnostykę retinopatii wcześniaczej okazały się obiecujące. Skłoniło to grupę międzynarodowego konsorcjum z 12 centrów akademickich do zaprojektowania oraz opracowania systemu komputerowej analizy wyników badania koherentnej tomografii siatkówki (OCT), które prezentuje 95% czułość [39].

Zdalna diagnostyka (telediagnostyka) jaskry

Telediagnostyka znajduje również zastosowanie w diagnostyce i leczeniu jaskry. Jaskra charakteryzuje się strukturalnymi zmianami w tarczy nerwu wzrokowego, podwyższonym ciśnieniem śródgałkowym, degeneracją komórek siatkówki oraz utratą pola widzenia [40]. Stanowi jedną z głównych przyczyn nieodwracalnej ślepoty, dotykającej ok. 64,3 mln pacjentów w wieku od 40 do 80 lat na całym świecie [41, 42]. Większość diagnoz jaskry jest stawiana na późnym etapie choroby, co przekłada się na tragiczny bilans leczenia i wyników.

Telediagnostyka daje możliwości oceny i monitorowania zmian w tarczy nerwu wzrokowego, ciśnienia śródgałkowego i pola widzenia. Diagnostyka jaskry na jednym z etapów opiera się bowiem na ocenie obrazu dna oka, który może być z powodzeniem interpretowany za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji bądź przy użyciu metod telediagnostyki. Pozwala to na szybką interwencję i przygotowanie spersonalizowanych planów leczenia dla pacjentów z jaskrą [40–42]. Ponadto telediagnostyka wspiera pacjentów w regularnym odbywaniu wizyt kontrolnych [43]. Wirtualna diagnostyka i kontrola odgrywają ważną rolę w obszarze badania ciśnienia wewnątrzgałkowego, OCT oraz pola widzenia, odciążając i świetnie sprawdzając się w realiach codziennej pracy instytucji świadczących usługi zdrowotne [44–46]. Znalazło to zastosowanie w utworzonych w Wielkiej Brytanii wirtualnych klinikach, specjalizujących się w telediagnostyce tej jednostki chorobowej [47].

Wielka Brytania stanowi przykład kraju, który wprowadził innowacyjne rozwiązania w diagnostyce jaskry. Około 50% szpitali z oddziałami okulistycznymi korzysta z wirtualnych klinik zajmujących się wspomnianym schorzeniem nerwu wzrokowego [48], przy czym dowiedziono, że zapewniają one efektywność, bezpieczeństwo pacjenta i akceptowalność przez chorych na takim samym lub wyższym poziomie co standardowa opieka [49]. Podczas gdy wirtualne kliniki mogą mieć pewne ograniczenia w wykrywaniu stanów ostrych, stanowią doskonałą formę porady specjalistycznej w przypadku chorób o wolniejszym, stabilnym przebiegu [50].

Zdalna diagnostyka (telediagnostyka) zwyrodnienia plamki żółtej związanego z wiekiem

AMD stanowi jedną z najczęstszych przyczyn utraty wzroku przez osoby w podeszłym wieku w krajach rozwijających się [51]. Wraz ze wzrostem odsetka społeczeństwa starzejącego się coraz poważniejszy staje się problem opieki zdrowotnej nad pacjentami dotkniętymi tą jednostką chorobową [51, 52]. W obliczu utajonego przebiegu choroby pacjenci są nieświadomi jej obecności do czasu przypadkowego rozpoznania problemu przez lekarza. Konieczne jest zatem usystematyzowanie i intensyfikacja prowadzenia badań przesiewowych, wzrost świadomości społecznej występowania chorób oczu i konieczności profilaktyki, wykonywania testów w domu oraz wizyt u lekarzy okulistów. Amerykańska Akademia Okulistyki opracowała wytyczne dotyczące diagnostyki i ustanowiła termin badań w kierunku AMD co 1–2 lata dla wszystkich osób w wieku 65 lat i starszych [53].

Metoda leczenia wysiękowej postaci choroby plamki związanej z wiekiem polega na iniekcjach doszkliskowych i powoduje znaczącą poprawę stanu klinicznego, niwelując zaburzenia widzenia zgłaszane przez pacjentów [54]. Konieczność powtarzania iniekcji co 1–2 miesiące jest jednak obciążająca ze względu na proceduralne podłoże, którymi musi być poprzedzona aplikacja leczenia [55]. Stanowi to logistyczny, ekonomiczny i organizacyjny problem dla placówek medycznych. Głównym problemem wdrażania leczenia AMD jest czas potrzebny na dopełnienie formalnych wymagań związanych z przyjęciem pacjentów do oddziałów szpitalnych i tendencja wzrostowa zachorowań na AMD w starzejącym się społeczeństwie [56]. W efekcie wykwalifikowany personel lekarski spędza wiele czasu na wypełnianiu obowiązków administracyjnych. Tymczasem literatura sugeruje, że diagnostyka i kontrole pacjentów z AMD mogą z powodzeniem zostać zastąpione metodami cyfrowymi z dwóch przyczyn [57]. Kontrole pacjentów, polegające na wykonaniu badań przy użyciu specjalistycznych urządzeń, są możliwe do zrealizowania za pomocą metod telediagnostyki bądź wspomnianego modelu „zapisz i przekaz”. Wdrożenie telediagnostyki i monitorowania pacjentów z AMD może zwiększyć odsetek osób stosujących się do zaleceń w zakresie wizyt kontrolnych [57, 58].

Monitorowanie przewlekłych chorób oczu z domu

Siatka Amslera opracowana przez Marca Amslera stała się w okulistyce prototypem monitorowania domowego pacjentów [59]. Test służy ocenie pola widzenia umożliwianego przez plamkę w zakresie od 12 do 15 stopni i stanowi narzędzie niezwykle użyteczne i stosowne do identyfikacji i monitorowania dysfunkcji plamki. Dzięki siatce Amslera diagnozowane mogą być różnorodne schorzenia plamki żółtej, takie jak: metamorfopsje w AMD, błona nasiatkówkowa lub torbielowaty obrzęk plamki wtórny do innych schorzeń (cukrzycowa choroba oczu, niedrożność żył siatkówkowych i zapalenie błony naczyniowej oka) [60].

Rozwój cyfrowych metod diagnostycznych w okulistyce doprowadził do wprowadzenia kilku cyfrowych nowości, służących cyfryzacji siatki Amslera, które przełożyły się na zadowalające rezultaty w samobadaniu pacjentów. Urządzenia ForeseeHome™ (Notal Vision, Inc.), myVisiontrack™ i Alleye™ zostały zaaprobowane przez FDA do wykrywania postępowania neowaskularnej postaci AMD [61]. Test na urządzeniu ForeseeHome™ składa się z serii wykropkowanych linii pojawiających się na ekranie urządzenia, a pacjenci za pomocą dołączonej myszy klikają miejsce, w którym

pojawia się linia [61]. Urządzenie zaprogramowane jest do wykrywania zmian w polu widzenia pacjentów, a wyniki przesyłane są na serwer i zapisywane. Częsta i możliwa do wykonania w domu kontrola przy pomocy powtarzalnych ćwiczeń determinuje wcześniejsze wykrycie postępu choroby i efektywne monitorowanie jej przebiegu [61, 62].

PODSUMOWANIE

Wczesna diagnostyka chorób oczu ma duże znaczenie dla zapobiegania utracie wzroku. Ograniczona dostępność kadr medycznych oraz długi czas oczekiwania na świadczenia z zakresu okulistyki dowodzą zasadności poszukiwania nowych technologii cyfrowych wpływających na usprawnienie i przeniesienie świadczenia usług zdrowotnych. Przedstawione w tej publikacji przykłady praktycznego wdrożenia technologii cyfrowych w okulistyce klinicznej wskazują na potencjał implementacji technologii informacyjno-komunikacyjnych w praktyce klinicznej, w tym w okulistyce. Walidacja dostępnych technologii w praktyce klinicznej i uwzględnianie ich w wytycznych międzynarodowych towarzystw naukowych może przyspieszyć proces wprowadzania innowacji w okulistyce. Należy dążyć do tworzenia warunków organizacyjno-prawnych wspierających wdrażanie technologii cyfrowych w medycynie, w tym okulistyce.

PIŚMIENICTWO

1. Senbekov M, Saliev T, Bukeyeva Z, et al. The Recent Progress and Applications of Digital Technologies in Healthcare: A Review. *Int J Telemed Appl.* 2020;2020:8830200. doi:10.1155/2020/8830200
2. Redd TK, Al-Khaled T, Paul Chan RV, et al. Technology and Innovation in Global Ophthalmology: The Past, the Potential, and a Path Forward. *Int Ophthalmol Clin.* 2023;63(1):25–32. doi:10.1097/IIO.0000000000000450
3. Bajwa J, Munir U, Nori A, et al. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. *Future Healthc J.* 2021;8(2):e188–e194. doi:10.7861/fhj.2021-0095
4. Lu ZX, Qian P, Bi D, et al. Application of AI and IoT in Clinical Medicine: Summary and Challenges. *Curr Med Sci.* 2021;41(6):1134–1150. doi:10.1007/s11596-021-2486-z
5. Hong Z, Li N, Li D, et al. Telemedicine During the COVID-19 Pandemic: Experiences From Western China. *J Med Internet Res.* 2020;22(5):e19577. doi:10.2196/19577
6. Perera MS, Halgamuge MN, Samarakody R, et al. Internet of Things in Healthcare: A Survey of Telemedicine Systems Used for Elderly People. 2021;1:21(1):933. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-15-9897-5_4
7. Ghebreyesus TA. „World Health Organization. WHO Director-General’s opening remarks at the media briefing on COVID-19 – 25 May 2020.” (2020)
8. WHO guideline Recommendations on Digital Interventions for Health System Strengthening. Geneva: World Health Organization; 2019.
9. Dia M, Davoudi S, Sanayei N, et al. Demographic and socioeconomic disparities in the hybrid ophthalmology telemedicine model. *J Telemed Telecare.* 2023;1357633X231211353. doi:10.1177/1357633X231211353
10. Li L, Jin Y, Wang JH, et al. Potency of teleophthalmology as a detection tool for diabetic retinopathy. *Sci Rep.* 2023;13(1):19620. doi:10.1038/s41598-023-46554-6
11. Bonilla-Escobar FJ, Sánchez-Cano D, Lasave AF, et al. Early-Phase Perceptions of COVID-19’s Impact on Ophthalmology Practice Patterns: A Survey from the Pan-American Association of Ophthalmology. *Clin Ophthalmol.* 2023;17:3249–3259. doi:10.2147/OPHTH.S434776
12. Wong YL, Noor M, James KL, et al. Ophthalmology Going Greener: A Narrative Review. *Ophthalmol Ther.* 2021;10:845–857. https://doi.org/10.1007/s40123-021-00404-8
13. Ittoop SM, SooHoo JR, Seibold LK, et al. Systematic Review of Current Devices for 24-h Intraocular Pressure Monitoring. *Adv Ther.* 2016;33(10):1679–1690. doi:10.1007/s12325-016-0388-4

14. Anderson AJ, Bedgood PA, George Kong YX, et al. Can Home Monitoring Allow Earlier Detection of Rapid Visual Field Progression in Glaucoma? *Ophthalmology*. 2017;124(12):1735–1742. doi:10.1016/j.ophtha.2017.06.028
15. Wisse RPL, Muijzer MB, Cassano F, et al. Validation of an Independent Web-Based Tool for Measuring Visual Acuity and Refractive Error (the Manifest versus Online Refractive Evaluation Trial): Prospective Open-Label Noninferiority Clinical Trial. *J Med Internet Res*. 2019;21(11):e14808. doi:10.2196/14808
16. Abràmoff MD, Lavin PT, Birch M, et al. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *NPJ Digit Med*. 2018;1:39. doi:10.1038/s41746-018-0040-6
17. Masumoto H, Tabuchi H, Nakakura S, et al. Deep-learning Classifier With an Ultrawide-field Scanning Laser Ophthalmoscope Detects Glaucoma Visual Field Severity. *J Glaucoma*. 2018;27(7):647–652. doi:10.1097/IJG.0000000000000988. PMID: 29781835
18. Liu H, Li L, Wormstone IM, et al. Development and Validation of a Deep Learning System to Detect Glaucomatous Optic Neuropathy Using Fundus Photographs. *JAMA Ophthalmol*. 2019;137(12):1353–1360. doi:10.1001/jamaophthalmol.2019.3501
19. Asaoka R, Murata H, Iwase A, et al. Detecting Preperimetric Glaucoma with Standard Automated Perimetry Using a Deep Learning Classifier. *Ophthalmology*. 2016;123(9):1974–80. doi:10.1016/j.ophtha.2016.05.029
20. Burlina PM, Joshi N, Pekala M, et al. Automated Grading of Age-Related Macular Degeneration From Color Fundus Images Using Deep Convolutional Neural Networks. *JAMA Ophthalmol*. 2017;135(11):1170–1176. doi:10.1001/jamaophthalmol.2017.3782
21. Brown JM, Campbell JP, Beers A, et al. Imaging and Informatics in Retinopathy of Prematurity (i-ROP) Research Consortium. Automated Diagnosis of Plus Disease in Retinopathy of Prematurity Using Deep Convolutional Neural Networks. *JAMA Ophthalmol*. 2018;136(7):803–810. doi:10.1001/jamaophthalmol.2018.1934
22. Balyen L, Peto T. Promising Artificial Intelligence-Machine Learning-Deep Learning Algorithms in Ophthalmology. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. 2019;8(3):264–272. doi:10.22608/APO.2018479
23. Deemer AD, Bradley CK, Ross NC, et al. Low Vision Enhancement with Head-mounted Video Display Systems: Are We There Yet? *Optom Vis Sci*. 2018;95(9):694–703. doi:10.1097/OPX.0000000000001278
24. Loewenstein A, Malach R, Goldstein M, et al. Replacing the Amsler grid: a new method for monitoring patients with age-related macular degeneration. *Ophthalmology*. 2003;110(5):966–70. doi:10.1016/S0161-6420(03)00074-5
25. Kaiser PK, Wang YZ, He YG, et al. Feasibility of a novel remote daily monitoring system for age-related macular degeneration using mobile handheld devices: results of a pilot study. *Retina*. 2013;33(9):1863–70. doi:10.1097/IAE.0b013e3182899258
26. Schmid MK, Faes L, Bachmann LM, et al. Accuracy of a Self-monitoring Test for Identification and Monitoring of Age-related Macular Degeneration: A Diagnostic Case-control Study. *Open Ophthalmol J*. 2018;12:19–28. doi:10.2174/1874364101812010019
27. Eckardt C, Paulo EB. HEADS-UP SURGERY FOR VITREORETINAL PROCEDURES: An Experimental and Clinical Study. *Retina*. 2016;36(1):137–47. doi:10.1097/IAE.0000000000000689
28. World Health Organization. World report on vision. Geneva: World Health Organization; 2019.
29. Rooney MR, Fang M, Ogurtsova K, et al. Global Prevalence of Prediabetes. *Diabetes Care*. 2023;46(7):1388–1394. doi:10.2337/dc22-2376
30. Sreelatha OK, Ramesh SV. Teleophthalmology: improving patient outcomes? *Clin Ophthalmol*. 2016;10:285–95. doi:10.2147/OPTh.S80487
31. Chan RV, Patel SN, Ryan MC, et al. The Global Education Network for Retinopathy of Prematurity (Gen-Rop): Development, Implementation, and Evaluation of A Novel Tele-Education System (An American Ophthalmological Society Thesis). *Trans Am Ophthalmol Soc*. 2015;113:T2.
32. Scotland GS, McNamee P, Fleming AD, et al. Scottish Diabetic Retinopathy Clinical Research Network. Costs and consequences of automated algorithms versus manual grading for the detection of referable diabetic retinopathy. *Br J Ophthalmol*. 2010;94(6):712–9. doi:10.1136/bjo.2008.151126
33. Nguyen HV, Tan GS, Tapp RJ, et al. Cost-effectiveness of a National Telemedicine Diabetic Retinopathy Screening Program in Singapore. *Ophthalmology*. 2016;123(12):2571–2580. doi:10.1016/j.ophtha.2016.08.021
34. Salongcay RP, Silva PS. The Role of Teleophthalmology in the Management of Diabetic Retinopathy. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. 2018;7(1):17–21. doi:10.22608/APO.2017479
35. Horton MB, Brady CJ, Cavallerano J, et al. Practice Guidelines for Ocular Telehealth-Diabetic Retinopathy, Third Edition. *Telemed JE Health*. 2020;26(4):495–543. doi:10.1089/tmj.2020.0006
36. Schwartz SD, Harrison SA, Ferrone PJ, et al. Telemedical evaluation and management of retinopathy of prematurity using a fiberoptic digital fundus camera. *Ophthalmology*. 2000;107(1):25–8. doi:10.1016/s0161-6420(99)00003-2
37. Dhaliwal C, Wright E, Graham C, et al. Wide-field digital retinal imaging versus binocular indirect ophthalmoscopy for retinopathy of prematurity screening: a two-observer prospective, randomised comparison. *Br J Ophthalmol*. 2009;93(3):355–9. doi:10.1136/bjo.2008
38. Fijalkowski N, Zheng LL, Henderson MT, et al. Stanford University Network for Diagnosis of Retinopathy of Prematurity (SUNDRROP): five years of screening with telemedicine. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2014;45(2):106–13. doi:10.3928/23258160-20140122-01
39. Campbell JP, Ataer-Cansizoglu E, Bolon-Canedo V, et al. Imaging and Informatics in ROP (i-ROP) Research Consortium. Expert Diagnosis of Plus Disease in Retinopathy of Prematurity From Computer-Based Image Analysis. *JAMA Ophthalmol*. 2016;134(6):651–7. doi:10.1001/jamaophthalmol.2016.0611
40. Tham YC, Li X, Wong TY, et al. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014;121(11):2081–90. doi:10.1016/j.ophtha.2014.05.013
41. Stevens GA, White RA, Flaxman SR, et al. Vision Loss Expert Group. Global prevalence of vision impairment and blindness: magnitude and temporal trends, 1990–2010. *Ophthalmology*. 2013;120(12):2377–2384. doi:10.1016/j.ophtha.2013.05.025
42. Tham YC, Li X, Wong TY, et al. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014;121(11):2081–90. doi:10.1016/j.ophtha.2014.05.013
43. Tatham AJ, Medeiros FA, Zangwill LM, et al. Strategies to improve early diagnosis in glaucoma. *Prog Brain Res*. 2015;221:103–33. doi:10.1016/bs.pbr.2015.03.001
44. Jonas JB, Wu SL, Wang Yx, et al. Diabetic retinopathy in China: population-based studies and clinical and experimental investigations. *The Lancet*. 2017;390(4):S30. doi:10.1016/S0140-6736(17)33168-9
45. Thomas SM, Jeyaraman MM, Hodge WG, et al. The effectiveness of teleglaucoma versus in-patient examination for glaucoma screening: a systematic review and meta-analysis. *Plos one*. 2014;9(12):e113779. doi:10.1371/journal.pone.0113779
46. Arora S, Rudnisky CJ, Damji KF. Improved access and cycle time with an „in-house” patient-centered teleglaucoma program versus traditional in-person assessment. *Telemed JE Health*. 2014;20(5):439–45. doi:10.1089/tmj.2013.0241
47. Wright HR, Diamond JP. Service innovation in glaucoma management: using a Web-based electronic patient record to facilitate virtual specialist supervision of a shared care glaucoma programme. *Br J Ophthalmol*. 2015;99(3):313–7. doi:10.1136/bjophthalmol-2014-305588
48. Kotecha A, Baldwin A, Brookes J, et al. Experiences with developing and implementing a virtual clinic for glaucoma care in an NHS setting. *Clin Ophthalmol*. 2015;9:1915–23. doi:10.2147/OPTh.S92409
49. Clarke J, Puertas R, Kotecha A, et al. Virtual clinics in glaucoma care: face-to-face versus remote decision-making. *Br J Ophthalmol*. 2017;101(7):892–895. doi:10.1136/bjophthalmol-2016-308993
50. Rosa JGS, Disner GR, Pinto FJ, et al. Revisiting Retinal Degeneration Hallmarks: Insights from Molecular Markers and Therapy Perspectives. *Int J Mol Sci*. 2023;24(17):13079. doi:10.3390/ijms241713079
51. Rein DB, Wittenborn JS, Burke-Conte Z, et al. Prevalence of Age-Related Macular Degeneration in the US in 2019. *JAMA Ophthalmol*. 2022;140(12):1202–1208. doi:10.1001/jamaophthalmol.2022.4401
52. Kido A, Miyake M, Tamura H, et al. Incidence and Clinical Practice of Exudative Age-related Macular Degeneration: A Nationwide Population-Based Cohort Study. *Ophthalmol Sci*. 2022;2(2):100125. doi:10.1016/j.xops.2022.100125
53. Brown DM, Kaiser PK, Michels M, et al. Ranibizumab versus verteporfin for neovascular age-related macular degeneration. *N Engl J Med*. 2006;355(14):1432–44. doi:10.1056/NEJMoa062655
54. Blodi BA, Domalpally A, Corkery E, et al. Prevalence of Macular Atrophy in the MARINA Study of Ranibizumab versus Sham for Neovascular Age-Related Macular Degeneration. *Ophthalmol Retina*. 2023;7(8):661–671. doi:10.1016/j.oret.2023.03.004
55. Moir J, Hyman MJ, Wang J, et al. Associations Between Autoimmune Disease and the Development of Age-Related Macular Degeneration. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2023;64(15):45. doi:10.1167/iov.64.15.45

56. Bakri SJ, Thorne JE, Ho AC, et al. Safety and Efficacy of Anti-Vascular Endothelial Growth Factor Therapies for Neovascular Age-Related Macular Degeneration: A Report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology*. 2019;126(1):55–63. doi:10.1016/j.ophttha.2018.07.028
57. Kawaguchi A, Sharafeldin N, Sundaram A, et al. Tele-Ophthalmology for Age-Related Macular Degeneration and Diabetic Retinopathy Screening: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Telemed JE Health*. 2018;24(4):301–308. doi:10.1089/tmj.2017.0100
58. Shih KC, Wong JKW, Lian JX, et al. Diagnostic accuracy of tele-ophthalmology versus face-to-face consultation: abridged secondary publication. *Hong Kong Med J*. 2023;29 Suppl 1(1):18–21.
59. Amsler M. L'Examen qualitatif de la fonction maculaire. *Ophthalmologica*. 1947;114:248–261.
60. Kalinowska A, Nowomiejska K, Brzozowska A, et al. Metamorphopsia Score and Central Visual Field Outcomes in Diabetic Cystoid Macular Edema. *Biomed Res Int*. 2018;2018:4954532. doi:10.1155/2018/4954532
61. Faura G, Boix-Lemonche G, Holmeide AK, et al. Colorimetric and Electrochemical Screening for Early Detection of Diabetes Mellitus and Diabetic Retinopathy-Application of Sensor Arrays and Machine Learning. *Sensors (Basel)*. 2022;22(3):718. doi:10.3390/s22030718
62. Chew EY, Clemons TE, Harrington M, et al. EFFECTIVENESS OF DIFFERENT MONITORING MODALITIES IN THE DETECTION OF NEOVASCULAR AGE-RELATED MACULAR DEGENERATION: The Home Study, Report Number 3. *Retina*. 2016;36(8):1542–7. doi:10.1097/IAE.0000000000000940