



OTWARTY DOSTĘP

REDAKCJA

Jean-Claude Mwanza,
Uniwersytet Karoliny Północnej w Chapel Hill,
Stany Zjednoczone

RECENZJA

Xinhao Wang,
Szpital Ludowy w Maoming, Chiny Qin
Jiang,
Szpital Nanjing Jiangning, Chiny

*KORRESPONDENCJA

Huiping Yuan✉
yuanhp2013@126.com

OTRZYMANO 17 października 2025 r.

POPRAWIONO 24 grudnia 2025 r.

AKCEPTACJA 29 grudnia 2025 r.

OPUBLIKOWANO 15 stycznia 2026 r.

CYTAT

Zhang S, Chen J, Yang H i Yuan H (2026)
Wyzwania diagnostyczne w przypadku wysokiej
krótkowzroczności: identyfikacja powikłań
zagrożających wzroku i rola sztucznej
inteligencji.

Front. Ophthalmol. 5:1727063. doi:
10.3389/fopht.2025.1727063

PRAWA AUTORSKIE

© 2026 Zhang, Chen, Yang i Yuan. Jest to
artykuł dostępny na zasadach otwartego
dostępu, rozpowszechniany na warunkach
licencji [Creative Commons Attribution License
\(CC BY\)](#). Wykorzystanie, rozpowszechnianie
lub reprodukcja na innych forach jest
dozwolone pod warunkiem podania autora
(autorów) i właściciela (właścicieli) praw
autorskich oraz cytowania oryginalnej publikacji
w tym czasopiśmie, zgodnie z przyjętą praktyką
akademicką. Wykorzystanie,
rozpowszechnianie lub reprodukcja niezgodne
z niniejszymi warunkami są zabronione.

Wyzwania diagnostyczne w przypadku wysokiej krótkowzroczności: identyfikacja powikłań zagrożających wzroku i rola sztucznej inteligencji

Shiqi Zhang¹, Jiaqi Chen¹, Hongli Yang² i Huiping Yuan^{1*}

¹ Katedra Okulistyki, Drugi Szpital Kliniczny Uniwersytetu Medycznego w Harbin, Harbin, Chiny, ² Devers Eye Institute, Legacy Health Research, Portland, Oregon, Stany Zjednoczone

Wysoka krótkowzroczność (HM), definiowana jako sferyczny ekwiwalent refrakcji $\leq -5,00$ lub \leq

$-6,00$ dioptrii lub długości osiowej (AL) $\geq 26,0$ mm, stanowi poważny problem zdrowia publicznego, którego częstość występowania szybko rośnie, szczególnie w Azji Wschodniej. Oprócz upośledzenia widzenia bez korekcji, HM wiąże się z zagrożającymi wzroku zmianami strukturalnymi, w tym makulopatią krótkowzroczną, neowaskularyzacją naczyń, odwarstwieniem siatkówki i jaskrą. Nakładające się i nietypowe objawy tych powikłań stanowią poważne wyzwanie diagnostyczne, często opóźniając interwencję i komplikując postępowanie kliniczne. Niniejszy przegląd stanowi syntezę aktualnej wiedzy na temat HM, kładąc nacisk na spektrum powikłań okulistycznych i wieloaspektowe dylematy diagnostyczne, z jakimi się spotykamy. Podsumowaliśmy zastosowanie konwencjonalnych i nowych technik diagnostycznych, takich jak optyczna tomografia koherencyjna (OCT), obrazowanie ultraszerokokątne i angiografia fluoresceinowa w diagnostyce wysokiej krótkowzroczności, oraz podkreśliliśmy rosnącą rolę sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego w poprawie dokładności diagnostycznej, szczególnie poprzez analizę obrazów siatkówki i danych OCT. Systemy oparte na sztucznej inteligencji wykazują wysoką czułość i specyficzność w wykrywaniu patologii związanych z HM, oferując potencjał do badań przesiewowych na dużą skalę i wczesnej interwencji. Przyszłe kierunki rozwoju obejmują opracowanie zintegrowanych platform obrazowania multimodalnego, biomarkerów genetycznych i metabolicznych oraz modeli predykcyjnych opartych na sztucznej inteligencji w celu wsparcia spersonalizowanych strategii leczenia. Ten kompleksowy przegląd podkreśla potrzebę zaawansowanych, dostępnych narzędzi diagnostycznych w celu złagodzenia obciążenia związanego z wysoką krótkowzrocznością.

SŁOWA KLUCZOWE

sztuczna inteligencja (AI), diagnostyka powikłań, wysoka krótkowzroczność, optyczna tomografia koherencyjna (OCT), krótkowzroczność patologiczna

1 Wprowadzenie

Krótkowzroczność, najczęściej występująca na świecie wada refrakcji, stanowi poważne i narastające wyzwanie dla zdrowia publicznego (1). Wysoka krótkowzroczność (HM), ogólnie definiowana jako wada refrakcji o równoważniku sferycznym (SE) $\leq -5,00$ dioptrii (D) lub $\leq -6,00$ D (2–4), stanowi najpoważniejszy przypadek krótkowzroczności. Częstość występowania wysokiej krótkowzroczności gwałtownie wzrosła, szczególnie w populacji azjatyckiej (5). Chociaż wada refrakcji pogarsza niekorzystnie widzenie na odległość, głównym skutkiem wysokiej krótkowzroczności są związane z nią zmiany patologiczne, które niosą ze sobą znaczne ryzyko wystąpienia schorzeń zagrażających wzroku. Często są to postępujące zmiany strukturalne w obrębie oka, określane jako krótkowzroczność patologiczna lub zwyrodnieniowa. Powikłania te obejmują między innymi zwyrodnienie plamki żółtej związane z krótkowzrocznością, neowaskularyzację naczyń, odwarstwienie siatkówki, rozszczep plamki żółtej, zanik naczyniowo-siatkówkowy i jaskrę (6). Zróżnicowany i złożony charakter tych powikłań, które często występują z nakładającymi się lub nietypowymi objawami klinicznymi, stanowi poważne wyzwanie diagnostyczne dla lekarzy. Ta nieodłączna trudność w dokładnym rozpoznaniu i rozróżnieniu patologii związanych z HM utrudnia podjęcie szybkiej interwencji i kompleksowego leczenia. Niniejszy przegląd ma na celu syntezę aktualnej wiedzy na temat wysokiej krótkowzroczności, zbadanie jej powikłań okulistycznych, a w szczególności omówienie wieloaspektowych dylematów diagnostycznych pojawiających się podczas jej oceny i rozpoznawania.

2 Wysoka krótkowzroczność

2.1 Definicja

Wysoka krótkowzroczność, powszechna i potencjalnie zagrażająca wzroku choroba, budzi coraz większe obawy ze względu na rosnącą częstość występowania na całym świecie. Diagnostyka opiera się zazwyczaj na pomiarach wad refrakcji, jak opisano wcześniej, przy rozluźnionej akomodacji oka (4). Jednak ta definicja oparta na refrakcji ma swoje ograniczenia, ponieważ nie uwzględnia pełnego spektrum zmian strukturalnych i patologicznych w oku. AL odgrywa również kluczową rolę w diagnostyce. Na przykład osoby z płaską rogówką mogą wykazywać zmiany oczne charakterystyczne dla wysokiej krótkowzroczności spowodowane nadmiernym wydłużeniem osiowym, nawet jeśli ich wada refrakcji nie spełnia konwencjonalnych progów diagnostycznych. Dlatego też wysoka krótkowzroczność jest w niektórych kontekstach definiowana jako długość osiowa (AL) $\geq 26,0$ mm (4, 7–9).

2.2 Epidemiologia

Badania epidemiologiczne wskazują na rosnącą globalną częstość występowania krótkowzroczności, ze szczególnie wyraźnym wzrostem w krajach Azji Wschodniej. W ciągu ostatnich 10–15 lat odsetek osób z wysoką krótkowzrocznością wzrósł z poniżej 10% do około 10–20% w niektórych populacjach Azji Wschodniej (10). Natomiast częstość występowania wysokiej krótkowzroczności w regionach poza Azją pozostaje stosunkowo niska. Metaanaliza danych

z konsorcjum European Eye Epidemiology (E3), które obejmowało pomiary wad refrakcji u 61 946 osób, wykazała, że częstość występowania wysokiej krótkowzroczności w Europie, po uwzględnieniu wieku, wynosi 2,7% (11), co podkreśla znaczne obciążenie krótkowzrocznością w tym regionie. Odnotowane wskaźniki wysokiej krótkowzroczności różnią się znacznie w innych populacjach: 0,3% w Danii (średni wiek 19,3 lat), 1,9% wśród 17-latków w Australii, 2,0% wśród mężczyzn i 2,3% wśród kobiet w wieku 16–22 lat w Izraelu oraz 3,92% w Stanach Zjednoczonych (10). Wśród afrykańskich uczniów częstość występowania krótkowzroczności jest niższa niż w innych częściach świata (12).

Zmiany środowiskowe i stylu życia w znacznym stopniu przyczyniły się do wzrostu częstości występowania krótkowzroczności i wysokiej krótkowzroczności na całym świecie (13). Rosnąca częstość występowania wczesnej krótkowzroczności — definiowanej przez Międzynarodowy Instytut Krótkowzroczności (IMI) jako krótkowzroczność, w której wada refrakcji przekracza poziom uważany za typowy dla danej grupy wiekowej dzieci — wydłuża okres progresji refrakcji, ponieważ dzieci dotknięte tą wadą często nadal ją rozwijają aż do połowy dwudziestego roku życia (14). To przedłużone okno progresji zwiększa ryzyko rozwoju wysokiej krótkowzroczności. Rosnąca tendencja do wczesnego występowania krótkowzroczności wśród osób, u których ostatecznie rozwija się wysoka krótkowzroczność, zapowiada pogorszenie się epidemii w nadchodzących dziesięcioleciach, biorąc pod uwagę, że znaczna część tych osób prawdopodobnie przejdzie do patologicznej krótkowzroczności (15).

2.3 Genetyka

Wada refrakcji jest cechą wysoce dziedziczną, a czynniki genetyczne stanowią główny determinant jej zmienności w populacjach. Pod względem genetycznym krótkowzroczność przejawia się w dwóch odrębnych formach: „zwykłej/poligenicznej” krótkowzroczności, spowodowanej skumulowanym działaniem wielu powszechnych wariantów genetycznych, które łącznie zwiększają ryzyko krótkowzroczności, oraz monogenicznej krótkowzroczności syndromicznej, która przebiega zgodnie z mendelowskimi wzorcami dziedziczenia (16). Pierwsza z nich może ulegać modyfikacji pod wpływem czynników środowiskowych i stylu życia, natomiast druga wynika z pojedynczego wariantu patogennego i często wiąże się z cechami ogólnoustrojowymi. *OPN1LW*, *COL2A1*, *COL11A1* i *P3H2* są związane z krótkowzrocznością mendelowską lub syndromiczną. Na przykład zespół Cohena — autosomalne zaburzenie recesywne charakteryzujące się postępującą dystrofią siatkówkowo-naczyniówkową, wysoką krótkowzrocznością i innymi objawami — wynika z biallelicznych wariantów patogennych w *VPS13B*, a diagnoza jest potwierdzana poprzez ocenę kliniczną i badania genetyczne (17).

Obecne dowody wskazują na kilka genów odpowiedzialnych za mendelowskie formy niesyndromowej wysokiej krótkowzroczności. *Gen ARR3*, który stanowi istotny czynnik monogeniczny dla izolowanej wczesnej wysokiej krótkowzroczności w niektórych kohortach, wykazuje wzorzec dziedziczenia sprzężony z chromosomem X, z przewagą kobiet (18). *Gen KDEL3* zidentyfikowano w badaniach asocjacyjnych całego eksomu chińskich osób z wysoką krótkowzrocznością (19). Pomimo wysokiej dziedziczności krótkowzroczności i konsensusu wynikającego z badań epidemiologicznych, które wskazują historię rodzinną jako główny czynnik ryzyka, nie wszystkie przypadki wysokiej krótkowzroczności można w pełni przewidzieć wyłącznie na podstawie czynników genetycznych. Badania genetyczne mogą mieć zastosowanie kliniczne w przypadku grup wysokiego ryzyka (np. osób z pozytywną historią rodzinną), natomiast ich przydatność w badaniach przesiewowych całej populacji pozostaje ograniczona.

3 Krótkowzroczność patologiczna

Krótkowzroczność patologiczna (PM) jest definiowana jako stan zagrażający wzroku, charakteryzujący się zmianami zwyrodnieniowymi w tylnym odcinku oka, będącymi następstwem nadmiernego wydłużenia osiowego w oczach z wysoką krótkowzrocznością (20). Stan ten stanowi zaawansowane stadium wysokiej krótkowzroczności i często jest mylony z samą wysoką krótkowzrocznością (13). Należy pamiętać, że nie wszystkie oczy z wysoką krótkowzrocznością osiągną ten stan patologiczny. Charakterystyczne objawy obejmują tylne staphyloma, makulopatię krótkowzroczną (taką jak rozlane lub plamiste zaniki naczyńkowo-siatkówkowe, pęknięcia lakierowe i zanik plamki żółtej) oraz neuropatię nerwu wzrokowego (13). Te zmiany strukturalne są głównymi czynnikami powodującymi nieodwracalne upośledzenie wzroku u osób dotkniętych tą chorobą.

Zmiany patologiczne i fizjologiczne związane z PM stanowią podstawę do postawienia diagnozy klinicznej. PM jest spowodowane przede wszystkim nadmiernym wydłużeniem osiowym — procesem, na który często wpływają czynniki środowiskowe (3). Wydłużenie to powoduje obciążenie biomechaniczne tkanek oka, prowadząc do zmian patologicznych, takich jak ścięczenie twardówki i upośledzenie biomechaniki, które przyczyniają się do powstania tylnego staphyloma (21). Jako cecha charakterystyczna patologicznej krótkowzroczności, tylne staphyloma wywiera nacisk na siatkówkę i naczyniówkę, co ostatecznie prowadzi do różnych chorób plamki żółtej.

Na rozwój i nasilenie tych zmian patologicznych wpływa kilka czynników wykraczających poza zwykłą wadę refrakcji lub pomiar długości osiowej gałki ocznej. Kluczowym czynnikiem jest wiek, ponieważ częstość występowania patologicznej krótkowzroczności jest znacznie wyższa w populacji osób w średnim wieku i starszych (0,9%–3,1%) w porównaniu z dziećmi i młodzieżą (<0,2%) (22), co wskazuje na postępującą, zależną od czasu pogorszenie się wysokiej krótkowzroczności. Naczyniówka odgrywa również kluczową rolę w patofizjologii patologicznej krótkowzroczności. Grubość naczyniówki (ChT) znacznie zmniejsza się wraz ze wzrostem krótkowzroczności i długości osiowej gałki ocznej (23), co jest dobrze udokumentowanym czynnikiem ryzyka makulopatii krótkowzrocznej (24). Na przykład zaproponowano konkretne wartości graniczne dla grubości naczyniówki plamki żółtej w celu klasyfikacji stopnia zaawansowania zaniku naczyniowo-siatkówkowego, podkreślając jego wartość prognostyczną (25).

Oprócz mechanicznego rozciągania i ścięczenia naczyńki inne ścieżki przyczyniają się do złożonej patofizjologii. Stres oksydacyjny ma również wpływ na patofizjologię wysokiej krótkowzroczności (26, 27). Niedotlenienie w oczach o długiej osi prowadzi do uszkodzeń oksydacyjnych, co może zakłócić neuromodulację wzrostu oka i bezpośrednio uszkodzić siatkówkę, ciało szkliste i soczewkę, przyczyniając się do powikłań, takich jak retinopatia, odwarstwienie siatkówki i powstawanie zaćmy (28–31). Zatem progresja do krótkowzroczności patologicznej jest procesem wieloczynnikowym, obejmującym uszkodzenia biomechaniczne, naczyniowe, komórkowe i molekularne.

Nie stwierdzono korelacji między licznymi genami podatności związanymi z krótkowzrocznością i wysoką krótkowzrocznością a neowaskularyzacją plamki żółtej (MNV) (32, 33). Jednakże badanie asocjacyjne całego genomu (GWAS) skupiające się na zwyrodnieniu plamki żółtej u osób krótkowzrocznych w populacji japońskiej zidentyfikowało CCDC102B jako gen podatności na tę chorobę, nie wykazując istotnego związku z długością osiową oka (34). Identyfikacja genu CCDC102B sugeruje, że diagnostyka genetyczna może odgrywać rolę w zapobieganiu zwyrodnieniu plamki żółtej związanemu z krótkowzrocznością.

4 Diagnoza powikłań wysokiej krótkowzroczności

4.1 Technika diagnostyczna

Diagnozowanie HM i PM wymaga kompleksowego podejścia, łączącego różne techniki diagnostyczne w celu dokładnej oceny stanu i związanych z nim powikłań. Fotografia dna oka jest kolejnym ważnym narzędziem. Pozwala ona uzyskać szerokie pole widzenia siatkówki, umożliwiając wykrycie zmian, takich jak pęknięcia lakieru, zanik naczyńkowo-siatkówkowy i plamka Fuchsa. Nowatorskie metody obrazowania, takie jak obrazowanie ultraszerokokątne (UWF) z polem widzenia od 100 do 200 stopni, pozwalają uchwycić zmiany w siatkówce, które nie są widoczne w tradycyjnej kolorowej fotografii dna oka, co prowadzi do poprawy dokładności badań przesiewowych i wczesnego wykrywania (35). Jednak sama fotografia dna oka może nie być wystarczająca do wykrycia niektórych subtelnych zmian, zwłaszcza we wczesnych stadiach choroby.

Optyczna tomografia koherencyjna (OCT) jest podstawą diagnostyki wielu powikłań. Pozwala ona uzyskać wysokiej rozdzielczości przekrojowe obrazy siatkówki, naczyniówki i twardówki, umożliwiając wykrycie charakterystycznych cech, takich jak krótkowzroczna foveoschisis, tylne staphyloma i ścięczenie naczyniówki (36). Nowe technologie OCT, takie jak EDI-OCT i SS-OCT, pozwoliły na lepsze zrozumienie patofizjologii HM i jej powikłań (37). Angiografia optyczna tomografii koherencyjnej (OCTA) umożliwia wizualizację układu mikronaczyniowego siatkówki bez konieczności stosowania środków kontrastowych, zapewniając szczegółowe obrazowanie sieci naczyniowej na różnych głębokościach siatkówki (38). Ta zdolność sprawia, że OCTA jest wysoce skutecznym narzędziem diagnostycznym do badań przesiewowych powikłań związanych z wysoką krótkowzrocznością.

Angiografia fluoresceinowa (FA) charakteryzuje się lepszą powtarzalnością i odtwarzalnością, co ułatwia diagnozowanie CNV związanego z krótkowzrocznością (39). Pozwala ona zrozumieć proces fizjopatologiczny zachodzący w oczach z zmianami krótkowzrocznymi i jest przydatna w wykrywaniu obecności i rodzaju CNV związanego z krótkowzrocznością. FA może również pomóc w odróżnieniu CNV od innych zmian plamkowych. Jednak jej inwazyjny charakter i potencjalne skutki uboczne ograniczają jej rutynowe stosowanie. Obecnie OCTA może służyć jako nieinwazyjna alternatywa dla niektórych funkcji diagnostycznych tradycyjnie wykonywanych przez FA (40). OCTA z ulepszoną kolorystyką wideo może pomóc w diagnozowaniu mMNV lepiej niż statyczna OCTA (wskaźnik diagnostyczny 95% do 77%) (41).

W niektórych przypadkach można zastosować inne metody badania, takie jak elektroretinografia (ERG), zwłaszcza gdy istnieją obawy dotyczące funkcji siatkówki. Na przykład u pacjentów z zespołem Knoblocha, który jest związany z wysoką krótkowzrocznością i odwarstwieniem siatkówki, ERG może ujawnić dysfunkcję wzorca czopków i pręcików, dostarczając cennych informacji na temat podstawowej patologii siatkówki (42). Podsumowując, obrazowanie multimodalne odgrywa kluczową rolę w precyzyjnej ocenie patologicznych zmian krótkowzroczności (43).

4.2 Diagnoza w przypadku makulopatii krótkowzrocznej

Makulopatia krótkowzroczna jest częstym powikłaniem wysokiej krótkowzroczności, a dokładna diagnoza ma zasadnicze znaczenie dla odpowiedniego

leczenia. Jednak globalny niedobór specjalistów przeszkolonych w zakresie krótkowzroczności oraz wyzwania diagnostyczne, przed którymi stoją ogólni dostawcy usług okulistycznych — tacy jak optycy i ogólni okuliści — podkreślają potrzebę stosowania standardowych narzędzi (20). Międzynarodowy system klasyfikacji i oceny fotograficznej makulopatii krótkowzrocznej został opracowany w celu ujednoczenia kryteriów diagnozy i oceny (44). System ten definiuje pięć kategorii makulopatii krótkowzrocznej, w tym brak zwyrodnieniowych zmian krótkowzrocznych siatkówki, mozaikowe dno oka, rozlane zaniki naczyńkowo-siatkówkowe, plamiste zaniki naczyńkowo-siatkówkowe i zanik plamki żółtej. Uwzględnia on również dodatkowe cechy, takie jak pęknięcia lakieru, neowaskularyzacja naczyń w krótkowzroczności i plamki Fuchsa, w oparciu o stopień trzech zmiennych: zanik (A), trakcja (T) i neowaskularyzacja (N).

(44). Dzięki sprawdzonej niezawodności i wysokiej powtarzalności ten system klasyfikacji zwiększa spójność diagnostyczną i poprawia komunikację między placówkami klinicznymi i badawczymi (45). OCT służy jako podstawowe narzędzie diagnostyczne w przypadku makulopatii krótkowzrocznej. Pozwala wykrywać różne zmiany plamki żółtej, takie jak rozszczepienie plamki żółtej, dziura plamki żółtej i neowaskularyzacja naczyń (CNV) (46). Oczy z HM charakteryzują się większą beznacyniową strefą plamki żółtej (FAZ) i zmniejszoną gęstością naczyń okołoplackowych (VD) w obu warstwach oraz mniejszą całkowitą gęstością naczyń (VD) (47). W przypadkach rozszczepienia plamki żółtej w krótkowzrocznych OCT wyraźnie pokazuje rozdzielanie siatkówki nerwowej na grubszą warstwę wewnętrzną i cieńszą warstwę zewnętrzną, a także pozwala monitorować postęp choroby. W przypadku CNV badanie OCT ujawnia charakterystyczne cechy, w tym hiperrefleksyjny materiał podsiatkówkowy, płyn wewnątrzsiatkówkowy lub podsiatkówkowy oraz pogrubienie siatkówki. Dzięki połączeniu wielomodalnego podejścia obrazowego, obejmującego OCT, OCTA, FA i ICGA, wraz z dokładną oceną demograficzną i kliniczną, możliwe staje się skuteczne odróżnienie mCNV od podobnych, ale jednostki heterogeniczne (43, 48).

Pojawiające się nowe metody diagnostyki molekularnej oferują obiecujące możliwości przewidywania i identyfikacji wczesnego zwyrodnienia plamki żółtej spowodowanego krótkowzrocznością za pomocą metod wysokoprzepustowych. Niektóre cechy metaboliczne osocza, takie jak kwas sebacynowy, wykazały potencjał diagnostyczny, osiągając wartości AUC wynoszące 0,874 i 0,889

(30). Ponadto Fan i wsp. zidentyfikowali 11 potencjalnych biomarkerów skorelowanych z nasileniem zanikowej zwyrodnienia plamki żółtej związanego z krótkowzrocznością (AMM) (49). Odkrycia te wskazują, że biomarkery krwi mogą odgrywać w przyszłości rolę w diagnostyce i monitorowaniu makulopatii związanej z krótkowzrocznością, chociaż konieczna jest dalsza walidacja w celu ustalenia ich przydatności klinicznej.

4.3 Jaskra w oczach z krótkowzrocznością

Krótkowzroczność, zwłaszcza wysoka, wiąże się ze zwiększonym ryzykiem jaskry. Patofizjologia leżąca u podstaw tego związku obejmuje kilka zmian strukturalnych i biomechanicznych w oku. Jednym z kluczowych aspektów jest zmiana w blaszce sitowej, która, jak stwierdzono, jest cieńsza w oczach krótkowzrocznych, co potencjalnie zwiększa podatność nerwu wzrokowego na ciśnienie wewnątrzgałkowe (IOP) (50, 51). Ponadto w oczach krótkowzrocznych często występuje powiększenie tarczy nerwu wzrokowego, jej przechylenie i zanik okołotarczowy, co może przypominać zmiany jaskrowe i utrudniać dokładną diagnozę (52).

Wykazano również, że grubość warstwy naczyńki i warstwy włókien nerwowych siatkówki (RNFL) jest związana z krótkowzrocznością (23). Te pokrywające się cechy strukturalne między neuropatią wzrokową związaną z krótkowzrocznością a uszkodzeniami jaskrowymi sprawiają, że rozpoznanie jaskry u osób krótkowzrocznych jest szczególnie trudne.

OCT umożliwia trójwymiarową wizualizację w czasie rzeczywistym oraz ilościową ocenę morfologii głowy nerwu wzrokowego, co czyni ją cennym narzędziem do wykrywania i monitorowania jaskry. W rezultacie znalazła szerokie zastosowanie w praktyce klinicznej (53). W porównaniu z pacjentami we wczesnym stadium jaskry z wysoką krótkowzrocznością, oczy z wysoką krótkowzrocznością wykazują wyraźne wzorce grubości siatkówki RNFL (54). W szczególności, w porównaniu z oczami normalnymi, oczy z wysoką krótkowzrocznością mają większą zdolność wykrywania problemów przy użyciu grubości cpRNFL w kwadrancie skroniowym (wyższy AUC), ale zmniejszoną zdolność w kwadrantach górnym i dolnym. Różnice te utrudniają rozróżnienie między uszkodzeniami jaskrowymi a zmianami strukturalnymi związanymi z krótkowzrocznością na podstawie samej grubości RNFL. Naukowcy badali różne markery w celu poprawy diagnostyki jaskry u pacjentów z krótkowzrocznością. Kluczowym punktem odniesienia anatomicznym jest otwór błony Brucha (BMO), który znajduje się na końcu błony Brucha przytwardzinowym. Minimalna szerokość obrzeża BMO (BMO-MRW), mierzona jako najkrótsza odległość od BMO do wewnętrznej błony ograniczającej (ILM), okazała się cenna w wczesnym wykrywaniu jaskry, wykazując wyższą czułość przy 95% swoistości w porównaniu z tradycyjnymi pomiarami grubości RNFL (55–57). Aby zwiększyć dokładność diagnostyczną w przypadku oczu krótkowzrocznych, grubość RNFL — szczególnie w kwadrancie dolno-skroniowym — można analizować wraz z BMO-MRW wokół tarczy nerwu wzrokowego. Struktury te są wyrównywane za pomocą oprogramowania Anatomical Positioning System (APS) w oparciu o oś od plamki żółtej do środka BMO (57). Takie połączone podejście poprawia rozróżnienie między zmianami jaskrowymi a krótkowzrocznymi. Ponadto, w porównaniu z konwencjonalnymi parametrami RNFL, BMO-MRW wykazuje porównywalną lub wyższą czułość, wyższą specyficzność, zmniejszony odsetek wyników fałszywie dodatnich oraz lepszą wydajność diagnostyczną w populacjach osób z krótkowzrocznością (58–61). Zatem BMO-MRW stanowi kluczowy parametr diagnostyczny, szczególnie w kontekście wysokiej krótkowzroczności.

Grubość warstwy włókien nerwowych siatkówki okołotarczowej (pRNFLT) i grubość wewnętrznej warstwy spłotowatej komórek zwojowych (GCIPLT) również wykazały potencjał w zakresie poprawy wykrywalności jaskry w oczach z wysoką krótkowzrocznością (62). Poza tymi warstwami siatkówki, zmiany strukturalne w blaszce sitowej (LC) zapewniają dodatkowe informacje diagnostyczne. Uszkodzenia LC występują znacznie częściej w oczach krótkowzrocznych z jaskrą niż w oczach bez jaskry

(63). W szczególności wady LC typu odłączenia (definiowane jako tylne przemieszczenie warstwy z nachyleniem w dół na dalekim obrzeżu LC w kierunku ściany kanału nerwowego) są powiązane z parametrami związanymi z krótkowzrocznością, takimi jak AL i zanik okołotarczowy strefy g (PPA), a także z obecnością samej jaskry (64). Ścisłe związane z tymi zmianami strukturalnymi jest zanik okołotarczowy (PPA), który często obserwuje się zarówno w oczach krótkowzrocznych, jak i z jaskrą. Na szczególną uwagę zasługują oczy z wysoką krótkowzrocznością, wykazujące większy zanik okołotarczowy w strefie g (gPPA), ponieważ cecha ta może sygnalizować zwiększone ryzyko wczesnego pogorszenia wzroku spowodowanego jaskrą (65).

Ponadto szerokopolowa angiografia optyczna tomografii koherencyjnej (WF-OCTA) stała się obiecującym narzędziem do diagnozowania jaskry u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością. WF-OCTA umożliwia szczegółową ocenę gęstości naczyń powierzchownych w okolicy tarczy nerwu wzrokowego i plamki żółtej, która często wykazuje zmiany w oczach z jaskrą i wysoką krótkowzrocznością (66). Metoda ta wykazała wysoką skuteczność diagnostyczną, z odnotowaną czułością i swoistością odpowiednio 87,28% i 86,94% w wykrywaniu jaskry w oczach z wysoką krótkowzrocznością. Warto zauważyć, że podczas gdy skuteczność diagnostyczna gęstości perfuzji okołotarczowej jest zmienna, gęstość perfuzji plamki żółtej zachowuje stałą dokładność diagnostyczną zarówno u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością, jak i bez wysokiej krótkowzroczności. W związku z tym obrazowanie plamki żółtej za pomocą OCTA i OCT odgrywa istotną rolę we wczesnej diagnostyce jaskry u osób z wysoką krótkowzrocznością (67, 68).

Badanie pola widzenia pozostaje niezbędne w diagnostyce jaskry, jednak jego dokładność u pacjentów z krótkowzrocznością jest często ograniczona przez strukturalne zmiany w oku. Aby sprostać tym wyzwaniom, opracowano dostosowane strategie badania. Na przykład protokół 10–2, który koncentruje się na centralnym polu widzenia, może poprawić wykrywalność wczesnych zmian jaskrowych, ponieważ oczy krótkowzroczne często wykazują defekty centralne (69). Ponadto wysoka krótkowzroczność może powodować przesunięcie wyników badania pola widzenia w kierunku krótkowzroczności, zacierając różnicę między rzeczywistą utratą widzenia spowodowaną jaskrą a artefaktami spowodowanymi wadą refrakcji. Jednym z proponowanych rozwiązań jest dostosowanie parametrów badania do stanu refrakcji. Nowe technologie, takie jak perymetria obiektywna, która ocenia opóźnienia regionalne i asymetrię między oczami, są obiecujące pod względem poprawy precyzji diagnostycznej u pacjentów z krótkowzrocznością (70). Konieczne są dalsze badania w celu udoskonalenia strategii perymetrycznych dostosowanych do tej populacji.

4.4 Odwarstwienie siatkówki w wysokiej krótkowzroczności

Odwarstwienie siatkówki jest poważnym powikłaniem wysokiej krótkowzroczności, dlatego tak ważne jest jego wczesne rozpoznanie i odpowiednie leczenie. Obecnie rozpoznanie odwarstwienia siatkówki w przypadku wysokiej krótkowzroczności opiera się często na połączeniu objawów zgłaszanych przez pacjenta i wyników badań klinicznych. Typowe objawy to nagłe pojawienie się mętów, błysków światła lub cienia przypominającego zasłonę w polu widzenia. W jednym z badań stwierdzono, że subiektywne pogorszenie widzenia było silnie związane z patologią siatkówki u pacjentów z ostrymi mroczkami lub błyskami w jednym oku, wykazując współczynnik prawdopodobieństwa wynoszący 7,9 (95% CI 5,2–12,1) (71). Wskazuje to na znaczenie szybkiej oceny okulistycznej u takich pacjentów w celu wykluczenia odwarstwienia siatkówki.

Pęknięcia siatkówki i obszary zwyrodnieniowe związane z wysoką krótkowzrocznością stanowią istotne czynniki ryzyka odwarstwienia siatkówki, zwłaszcza w obwodowej części siatkówki. Tradycyjne metody diagnostyczne, takie jak badanie dna oka po rozszerzeniu źrenicy, umożliwiają bezpośrednią wizualizację pęknięć, rozdarć lub odwarstwień siatkówki, ale mają ograniczenia w przypadku badań przesiewowych obwodowej części siatkówki na dużą skalę. Oftalmoskopia pośrednia jest podatna na przeoczenie lub błędną diagnozę zmian chorobowych — szczególnie w przypadku oczu z mętami ośrodków refrakcyjnych — ze względu na stosunkowo niskie powiększenie, odwrócony obraz i strumą krzywą uczenia się (72). Podobnie badanie za pomocą soczewki kontaktowej z trzema zwierciadłami

oferuje szerokie pole widzenia i silny efekt stereoskopowy, ale wymaga kontaktu z rogówką, co często powoduje dyskomfort pacjenta i słabą współpracę. Ponadto nie ma możliwości rejestrowania badania w postaci zdjęć lub filmów (73). Wyzwania te są jeszcze większe w przypadku oczu z wysoką krótkowzrocznością, gdzie zmiany strukturalne, takie jak tylny staphyloma i inne makulopatie, mogą zwiększać ryzyko odwarstwienia i dodatkowo zmniejszać dokładność badania.

Pojawienie się szerokokątnego obrazowania dna oka wprowadziło bardziej skuteczne podejście (74). Na przykład ultraszerokokątny oftalmoskop laserowy o kącie widzenia 200 stopni (Datonna) wykrywał zmiany obwodowe siatkówki z wynikiem pozytywnym wynoszącym 15,50%, porównywalnym do wyniku uzyskanego przy użyciu soczewek kontaktowych z trzema zwierciadłami (75). Ponadto nowoczesne systemy obrazowania, takie jak Opel Panorama 200 i Zeiss Clarus 500, wykazały wysoką i stałą czułość w identyfikowaniu pęknięć siatkówki — w tym tych w odległej części skroniowej — i oferują lepszą wydajność w przypadku oczu z nieprzezroczystością ośrodków refrakcyjnych (76). Równolegle wprowadzenie OCT zmieniło podejście do diagnostyki klinicznej odwarstwienia siatkówki, zapewniając wysokiej rozdzielczości przekrojowe obrazy warstw siatkówki. Możliwość ta pozwala na precyzyjną ocenę rodzaju odwarstwienia, jego zakresu i zajęcia plamki żółtej, co okazuje się szczególnie cenne w przypadkach ograniczonej widoczności dna oka (77). Ponadto pojawienie się zaawansowanych metod OCT, w tym SD-OCT, SS-OCT, OCT-A, OCT z optyką adaptacyjną i OCT en face, nie tylko zwiększa precyzję diagnostyczną, ale także przyczynia się do bardziej zindywidualizowanego podejścia do leczenia (78). Biomarkery — takie jak integralność EZ, obecność ORCS i pomiary wysokości odwarstwienia siatkówki — znacznie poprawiły naszą zdolność do przewidywania wyników widzenia po operacji (78). Oprócz biomarkerów strukturalnych i naczyniowych dostarczanych przez OCT, inne wskaźniki okazały się obiecujące jako potencjalne narzędzia do badań przesiewowych w kierunku odwarstwienia siatkówki. Na przykład parametry hemodynamiczne mierzone za pomocą ultrasonografii tętnic szyjnych (CUS) są związane z podwyższonym ryzykiem odwarstwienia siatkówki (79). Na poziomie genetycznym badania GWAS zidentyfikowały trzy znaczące polimorfizmy pojedynczych nukleotydów (SNP), które są silnie wyrażone na granicy odwarstwienia siatkówki (79). Ponadto w przypadku oczu krótkowzrocznych przesunięcie refrakcji dna oka nadal jawi się jako realny spersonalizowany biomarker służący do oceny ryzyka pęknięcia lub odwarstwienia siatkówki (80). Dlatego też integracja wielu metod obrazowania ma zasadnicze znaczenie dla wczesnej diagnostyki i oceny ryzyka.

warstwowanie odwarstwienia siatkówki u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością.

5 Nowe technologie

Nowe technologie rewolucjonizują wykrywanie i leczenie wysokiej krótkowzroczności oraz związanych z nią powikłań. Szczególnie obiecującym osiągnięciem jest zastosowanie sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego (ML). Ostatnie badania wykazały wyraźne przejście od tradycyjnego uczenia maszynowego do technik głębokiego uczenia się w diagnostyce krótkowzroczności (81). Systemy oparte na sztucznej inteligencji wykazują dużą zdolność do analizowania dużych ilości danych okulistycznych, co ułatwia identyfikację wysokiej krótkowzroczności i jej powikłań, w tym

zdjęcia dna oka, skany optycznej tomografii koherencyjnej (OCT) i inne parametry kliniczne. Obecnie AI stała się potężnym narzędziem w diagnostyce makulopatii krótkowzrocznej i jaskry. Niemniej jednak analiza wysokiej krótkowzroczności i krótkowzroczności patologicznej (PM) pozostaje wyzwaniem ze względu na konieczność przetwarzania obszernych zbiorów danych, które obejmują zarówno biomarkery obrazowania oka, jak i zmiany morfologiczne w siatkówce i naczyniówce (20). W tabeli 1 wymieniono niektóre modele sztucznej inteligencji służące do diagnozowania wysokiej krótkowzroczności oraz ich zalety.

5.1 Sztuczna inteligencja w diagnostyce PM

Dzięki szkoleniu na obszernych zbiorach danych obrazowych OCT model sieci neuronowej konwolucyjnej (CNN) może dokładnie identyfikować różne zmiany w dnie oka u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością, takie jak rozwarstwienie siatkówki

rozszczepienie siatkówki, dziura plamki żółtej, odwarstwienie siatkówki i patologiczna neowaskularyzacja naczyniówki (83). Wykrywanie tych zmian pozwala osiągnąć wartości obszaru pod krzywą ROC (AUC) w zakresie od 0,961 do 0,999, przy czułości przewyższającej czułość specjalistów w dziedzinie siatkówki i swoistości konsekwentnie przekraczającej 90% (82). Ponadto algorytm głębokiego uczenia oparty na zdjęciach dna oka odgrywa również znaczącą rolę w diagnozowaniu wysokiej krótkowzroczności i jej powikłań. Ucząc się na podstawie dużych zbiorów danych obrazów siatkówki, modele te wyodrębniają kluczowe cechy pozwalające określić obecność wysokiej krótkowzroczności lub patologicznej krótkowzroczności, a także związanych z nimi zmian plamki żółtej (84). W badaniu wielokohortowym system głębokiego uczenia wykazał wysoką skuteczność diagnostyczną w przypadku zwyrodnienia plamki żółtej spowodowanego krótkowzrocznością i wysokiej krótkowzroczności. Osiągnął on wartości AUC wynoszące 0,969 (95% CI: 0,959–0,977) lub wyższe w przypadku zwyrodnienia plamki żółtej związanego z krótkowzrocznością oraz 0,913 (0,906–0,920) lub wyższe w przypadku wysokiej krótkowzroczności — przewyższając sześciu ekspertów w wykrywaniu każdego z tych schorzeń.

TABELA 1 Modele sztucznej inteligencji (AI) w diagnostyce wysokiej krótkowzroczności i powikłań.

Choroba	Badania	Typ modelu	Zmienne modelowania	Auc lub dokładność	Zalety
krótkowzroczna makulopatia	Takahiro S i in. (82).	DNN	SS-OCT	0,97	Klasyfikacja obrazów OCT bez krótkowzrocznych zmian plamkowych oraz obrazów OCT z krótkowzrocznymi zmianami plamkowymi, takimi jak mCNV i RS, z wysoką dokładnością
	Yonghao Li i in. (83).	CNN	Obrazy plamki żółtej OCT	0,961 do 0,999	1. Czułość równa lub nawet lepsza od czułości specjalistów chorób siatkówki, a także wysoka specyficzność. 2. Zapewniono przejrzystą i możliwą do interpretacji diagnozę za pomocą map cieplnych.
	Tien-En T i in. (84).	ResNet-101 (CNN)	CFP	0,969 lub wyższa	Algorytmy głębokiego uczenia się osiągnęły lepsze wyniki niż wszystkich sześciu ekspertów oceniających w wykrywaniu każdego schorzenia
	Juzhao Z, et al (85).	SSL	CFP	0,973 do 0,999	wysoka dokładność i potencjał do usprawnienia badań przesiewowych w kierunku krótkowzroczności na dużą skalę
Jaskra	Ai-Su Y, i in. (86).	VE-GCCLS i OMEGA-Net	SAP, PP i OCT	0,887 ± 0,006	uwzględniają parametry SAP i PP; najwyższa skuteczność diagnostyczna we wszystkich wskaźnikach
	An Ran R i in. (87).	wielozadaniowy model 3D-DL	SD-OCT	0,949 i 0,965	Obecność MF nie miała wpływu na dokładność wykrywania GON
	Yen-Ying C i in. (88).	CBAM	CFP	0,894	Rozpoznawanie jaskry na podstawie zdjęć dna oka
	Christopher B i in. (8).	Model oparty na autoenkoderze głębokiego uczenia	SS-OCT	0,92	Z większą dokładnością diagnostyczną niż model pojedynczego autoenkodera, globalna grubość RNFL i podejścia oparte na teksturze en face.
	Swati S, et al (89).	specjalistyczna sieć zespołowa	OCT	0,92 ± 0,03	Zmiany strukturalne w ONH w stanach H, HM, G i HMG
	Siamak Y i in. (90).	GEM	Pole widzenia	–	Rozdzielone pola technologii podawania częstotliwości (FDT) z oczu zdrowych i dotkniętych jaskrą oraz zidentyfikowane znane wzorce utraty widzenia związane z jaskrą.
	Nahida A i in. (91).	ResNet18 i VGG16	Humphrey 24–2 VF	97,00	Podobne do konwencjonalnych wskaźników globalnych, mogą pomóc lekarzom w precyzyjnym wykrywaniu jaskry i zarządzaniu jej postępem.
Pojawienie się i postęp krótkowzroczności	Zengshuo W i in. (92).	głęboka sieć neuronowa (Myopic-Net)	CFP	87,30	Rozpoznawanie początku i postępu krótkowzroczności na podstawie par obrazów dna oka przy użyciu zmian anatomicznych w tarczy nerwu wzrokowego i obszarach otaczających
	Jiajia L i in. (93).	EBM, GBDT, DNN i XGBoost	nowoczesne zachowania i biometria oka, i in.	0,92; 71% dokładność	Adaptacyjne integrowanie różnorodnych zbiorów danych
	Min H, i in. (94).	XGBoost	OCT i CFP	0,845 ± 0,050	Integracja danych multimodalnych w celu zwiększenia dokładności przewidywania wystąpienia krótkowzroczności

(84). Następnie opracowano system głębokiego uczenia się wzbogacony o samokontrolujące się uczenie się, służący do identyfikacji makulopatii krótkowzrocznej u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością (85). Wyniki walidacji zewnętrznej osiągnęły 89,0% dokładności, 71,7% czułości, 87,8% swoistości oraz AUC na poziomie 0,978 i 0,973. Wyniki te podkreślają potencjał głębokiego uczenia się w zakresie zwiększania dokładności diagnostycznej w przypadku krótkowzroczności patologicznej i zmniejszania zależności od interpretacji ludzkiej.

W rozwoju technologii sztucznej inteligencji stosowanych w okulistyce obserwuje się ciągle innowacje. Metaanaliza metod uczenia maszynowego w przypadku wysokiej krótkowzroczności wykazała, że w przypadku diagnozowania krótkowzroczności patologicznej podsumowująca charakterystyka operacyjna odbiornika (SROC) wyniosła 0,97 (95% CI: 0,95–0,98), a

czułością i swoistością wynoszącą odpowiednio 0,91 (95% CI: 0,89–0,92) i 0,95

(95% CI: 0,94–0,97) (95). Te wysokowydajne systemy sztucznej inteligencji wykazują ogromny potencjał w zakresie wczesnego wykrywania — szczególnie w programach badań przesiewowych na dużą skalę — poprzez szybką analizę ogromnych ilości obrazów i identyfikację osób z wysokim ryzykiem wysokiej krótkowzroczności lub jej powikłań.

Aby jeszcze bardziej poprawić niezawodność diagnostyczną, opracowano multimodalne systemy sztucznej inteligencji, które integrują różne źródła danych, takie jak zdjęcia dna oka, obrazy OCT i informacje kliniczne o pacjentach, umożliwiając bardziej kompleksową i dokładną ocenę (96). Jednocześnie coraz większy nacisk kładzie się na interpretowalność modeli. Techniki takie jak mapowanie aktywacji klas ważonych gradientem (Grad-CAM) są wykorzystywane do wizualizacji procesu podejmowania decyzji przez sztuczną inteligencję, pomagając w ten sposób lekarzom zrozumieć podstawy diagnozy i zwiększając zaufanie do wyników generowanych przez sztuczną inteligencję (97).

W przypadku badań przesiewowych na dużą skalę sztuczna inteligencja wykazała znaczne zalety. Na przykład w badaniach przesiewowych chorób dna oka przeprowadzonych w społeczności lokalnej system sztucznej inteligencji wykorzystywany do analizy kolorowych zdjęć dna oka wykazał wysoką dokładność, specyficzność i ujemną wartość predykcyjną w wykrywaniu różnych chorób siatkówki — w tym krótkowzroczności patologicznej — zapewniając niezawodną metodę identyfikacji wielu schorzeń siatkówki w podstawowej opiece zdrowotnej (98). Wyniki te podkreślają zdolność sztucznej inteligencji do zwiększenia zarówno skuteczności, jak i dokładności diagnozowania wysokiej krótkowzroczności i krótkowzroczności patologicznej, wspierając w ten sposób wczesne wykrywanie i terminową interwencję.

5.2 Sztuczna inteligencja w diagnostyce jaskry krótkowzrocznej

Sztuczna inteligencja stała się potężnym narzędziem w diagnostyce jaskry krótkowzrocznej, służąc jako kluczowa metoda obrazowania w tym kontekście, a integracja sztucznej inteligencji znacznie zwiększyła jej potencjał diagnostyczny. Systemy OCT wzbogacone o sztuczną inteligencję mogą analizować złożone dane obrazowe w celu wykrywania wczesnych objawów jaskry krótkowzrocznej z wysoką precyzją (86). Jednym z kluczowych zastosowań jest pomiar grubości warstwy włókien nerwowych siatkówki (RNFL). Analiza oparta na sztucznej inteligencji umożliwia precyzyjną kwantyfikację zmian sektorowych, które mogą wskazywać na wczesne uszkodzenia jaskrowe. Na przykład u pacjentów z jaskrą wysokim krótkowzrocznością (HMG) stopień ścięczenia RNFL w kwadrancie skroniowym i sektorze godziny ósmej był większy (99).

Modele głębokiego uczenia są coraz częściej stosowane do analizy zarówno skanów OCT, jak i zdjęć dna oka w celu wykrywania jaskry. Wielozadaniowy trójwymiarowy (3D) model głębokiego uczenia został przeszkolony do jednoczesnego wykrywania neuropatii jaskrowej (GON) i cech krótkowzroczności na podstawie skanów wolumetrycznych OCT w domenie spektralnej (87). Model ten wykazał wysoką ogólną przydatność w różnych zestawach danych, osiągając obszar pod krzywą charakterystyki operacyjnej odbiornika (AUROC) wynoszący 0,949 podczas wewnętrznej walidacji wykrywania GON — przewyższając wyniki średnich pomiarów grubości warstwy włókien nerwowych siatkówki (RNFL).

Jednak większość systemów sztucznej inteligencji nadal opiera się na grubości RNFL w celu postawienia diagnozy i potrzeba więcej modeli, aby zwiększyć niezawodność, takich jak metoda analizy oparta na teksturze en-face (88). Trójwymiarowy system obrazowania oparty na sztucznej inteligencji może jeszcze bardziej zwiększyć dokładność diagnostyczną jaskry u osób z wysoką krótkowzrocznością (100). Ponieważ zmiany strukturalne wywołane przez HM występują z większą liczbą cech w przestrzeni trójwymiarowej, takich jak przechylenie tarczy nerwu wzrokowego i trakcja twardówki, wymaga to większej ilości danych i dalszych modeli w celu poprawy dokładności diagnostycznej. Ponadto modele AI szkolone na różnych typach oczu mogą działać lepiej (8).

Oprócz metod opartych na OCT, systemy sztucznej inteligencji okazały się skuteczne w analizowaniu zdjęć dna oka. Na przykład system głębokiego uczenia się, wyszkolony na zdjęciach dna oka osób z wysoką krótkowzrocznością, osiągnął AUROC na poziomie 0,894 w identyfikacji przypadków jaskry (101). Aby jeszcze bardziej poprawić dokładność wykrywania, naukowcy zastosowali model podwójnego autoenkodera, który integruje błędy rekonstrukcji zarówno ze zdrowych, jak i jaskrowych danych szkoleniowych, co prowadzi do poprawy wydajności w identyfikacji jaskry (8). W ostatnim badaniu wykorzystano podejście głębokiego uczenia 3D do klasyfikacji struktur głowy nerwu wzrokowego (ONH) poprzez konwersję skanów OCT na chmury punktów 3D i zastosowanie sieci zespołowej. Badania te pozwoliły zidentyfikować unikalne cechy strukturalne ONH w jaskrze, wysokiej krótkowzroczności i ich połączeniu (HMG). Kluczowe cechy wyróżniające ONH w HMG obejmowały ogniskowe wyżłobienie, głębokie wykopanie zagłębienia nerwu wzrokowego, ścięczenie tkanki przedwarstwowej i znacznie mniejszy MRW

(89). Badania te potwierdzają potencjał danych morfologicznych w poprawę diagnostyki jaskry u pacjentów z krótkowzrocznością.

ML zostało również zastosowane do analizy pól widzenia w jaskrze. Techniki nienadzorowane, takie jak model mieszanki Gaussa z maksymalizacją oczekiwań (GEM), pozwalają odróżnić nieprawidłowe pola widzenia (VF) od prawidłowych i zidentyfikować charakterystyczne wzorce utraty widzenia w jaskrze (90). Model oparty na CNN, opracowany do klasyfikacji obrazów VF, osiągnął wysoką dokładność w odróżnianiu przypadków jaskry od przypadków normalnych (91). Ponadto integracja parametrów funkcjonalnych VF z danymi strukturalnymi OCT poprzez głębokie uczenie się pomaga zmniejszyć zakłócenia diagnostyczne spowodowane wysoką krótkowzrocznością (86). Niemniej jednak zastosowanie sztucznej inteligencji w diagnozowaniu pól widzenia w jaskrze w populacjach krótkowzrocznych nadal wymaga dalszych badań.

Wysokowydajne systemy sztucznej inteligencji mogą usprawnić badania przesiewowe w kierunku jaskry u osób z krótkowzrocznością, szczególnie w warunkach ograniczonych zasobów. Jednak przed szerszym

wdrożeniem klinicznym. W diagnostyce opartej na fotografii dna oka wyniki generowane przez sztuczną inteligencję mogą wpływać na decyzje kliniczne, zwłaszcza wśród mniej doświadczonych lekarzy (102). Pomimo tych ograniczeń sztuczna inteligencja nadal stanowi obiecujące rozwiązanie dla poprawy dokładności i skuteczności diagnostyki jaskry u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością.

5.3 Modele predykcyjne krótkowzroczności

Przewidywanie wystąpienia i postępu krótkowzroczności odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu i leczeniu zarówno wysokiej, jak i zwykłej krótkowzroczności, ponieważ ułatwia wczesne wykrywanie osób z grupy wysokiego ryzyka, umożliwia wcześniejsze diagnozowanie i wspiera terminowe wdrażanie strategii profilaktycznych. Modele prognostyczne uwzględniają wiele czynników w celu zwiększenia dokładności. Wiek wystąpienia krótkowzroczności został uznany za ważny czynnik prognostyczny; na przykład badanie przeprowadzone wśród dzieci w Singapurze wykazało, że wcześniejsze wystąpienie krótkowzroczności wiązało się ze zwiększonym ryzykiem rozwoju wysokiej krótkowzroczności w późniejszym okresie dzieciństwa (103). Wskazuje to na znaczenie wczesnych badań przesiewowych i monitorowania populacji pediatrycznej w celu identyfikacji osób podatnych na HM i jej powikłania.

Czynniki genetyczne również mają istotny wpływ na modele prognostyczne. Identyfikacja konkretnych mutacji genetycznych związanych z wysoką krótkowzrocznością — takich jak zmiany w *genie LEPRELI* — może poprawić stratyfikację ryzyka, szczególnie w rodzinach z historią powikłań związanych z krótkowzrocznością (104). Połączenie markerów genetycznych z parametrami klinicznymi daje nadzieję na stworzenie bardziej spersonalizowanych i dokładnych narzędzi prognostycznych. Kolejnym kluczowym wymiarem są wpływy środowiskowe. Czynniki takie jak ograniczony czas spędzany na świeżym powietrzu, długotrwała praca w bliskiej odległości oraz aspekty środowiska życia — takie jak duża gęstość zaludnienia i ograniczona przestrzeń mieszkalna — są związane z rozwojem krótkowzroczności (105). Połączenie parametrów środowiskowych, genetycznych i okulistycznych może doprowadzić do opracowania bardziej holistycznych i solidnych modeli prognostycznych dla wysokiej i patologicznej krótkowzroczności.

Opracowywane są modele predykcyjne oparte na uczeniu maszynowym, które pozwalają ocenić ryzyko powikłań w przypadku wysokiej krótkowzroczności, uwzględniając zmienne demograficzne, genetyczne, środowiskowe i okulistyczne. Na przykład głęboka sieć neuronowa o nazwie Myopic-Net wykazuje wysoką dokładność, niezawodność i uogólnienie w wykrywaniu i śledzeniu postępu krótkowzroczności na podstawie zmian anatomicznych w obrazach dna oka (92). Ponadto istnieją badania poświęcone integracji wielu danych w celu dalszego udoskonalenia modeli przewidywania postępu krótkowzroczności. Model scalający może integrować różne czynniki ryzyka, w tym biometrię oka i czynniki genetyczne, oraz obliczać kompleksową ocenę ryzyka dla każdego pacjenta (93). Jednak różne podejścia do scalania tych modeli (scalanie sekwencyjne, proste uśrednianie i uczenie transferowe) charakteryzują się różnicami w znaczeniu poszczególnych cech, co ostatecznie wpływa na wyniki. Inne podejście oparte na modelu mieszanym podkreśla potencjał integracji danych multimodalnych w umożliwianiu spersonalizowanych strategii leczenia krótkowzroczności. Zintegrowało ono obrazowanie multimodalne — takie jak optyczna tomografia koherencyjna 3D (OCT) i kolorowa fotografia dna oka (CFP) — i osiągnęło AUROC na poziomie 0,845 ± 0,050 w przewidywaniu wystąpienia krótkowzroczności (94). Ze względu na liczne czynniki wpływające na krótkowzroczność oraz

ograniczeń istniejących modeli, stworzenie prawdziwie zintegrowanego i spersonalizowanego modelu prognostycznego stanowi wyzwanie.

5.4 Ograniczenia sztucznej inteligencji

Chociaż sztuczna inteligencja została wprowadzona w celu rozwiązania problemów związanych z diagnozowaniem wysokiej krótkowzroczności, nadal istnieje wiele nierozwiązanych wyzwań. Po pierwsze, jakość i ilość danych mają ogromne znaczenie dla zastosowania sztucznej inteligencji. Jednak istniejące zbiory danych AI zazwyczaj dotyczą tylko jednej lub kilku konkretnych grup osób. Może to skutkować słabą ogólną przydatnością i utrudniać określenie, czy słabe wyniki są spowodowane tendencyjnością spektrum (106–108). W rozwiązaniu tego problemu mogą pomóc badania wielośrodkowe i publiczne zbiory danych. Obecnie istnieje kilka publicznych zbiorów danych dotyczących innych chorób oczu, ale żaden z nich nie koncentruje się na krótkowzroczności (109, 110).

Diagnoza postawiona przez sztuczną inteligencję nadal opiera się na istniejących kryteriach diagnostycznych stosowanych przez lekarzy, a dane szkoleniowe obejmują subiektywne oceny lekarzy dokonujących adnotacji. Dlatego subiektywność obserwatora wprowadza różnice w diagnozach. Ograniczając subiektywność ludzkich obserwatorów, sztuczna inteligencja może zwiększyć spójność diagnoz (111). Jednak poprawa ta zależy od projektu i wdrożenia systemu sztucznej inteligencji. Chociaż sztuczna inteligencja nigdy nie może wykroczyć poza zakres danych szkoleniowych, jej dobra spójność i powtarzalność mogą pomóc w zmniejszeniu rozbieżności diagnostycznych między różnymi lekarzami, a nawet w przypadku tego samego lekarza w różnych momentach. Ponadto głębokie uczenie się może wydobywać złożone kombinacje cech z danych, które wykraczają poza bezpośrednią percepcję wzrokową lub poznawczą człowieka, pomagając w ten sposób odkrywać obiektywne wskaźniki w danych. Dlatego też ważną kwestią do rozważenia pozostaje sposób bardziej rozsądnego wdrażania sztucznej inteligencji w diagnostyce.

Ponadto model „czarnej skrzynki” ogranicza zrozumienie zarówno klinycystów, jak i pacjentów, a decyzje diagnostyczne są niejasne. Ryzyko związane z algorytmami „czarnej skrzynki” jest szczególnie krytyczne, ponieważ błędne diagnozy mogą prowadzić do nieodwracalnej utraty wzroku. Stosowanie modelu przewidującego postępowanie jaskry opartego wyłącznie na mapach grubości uzyskanych za pomocą OCT, bez zrozumienia jego zależności od parametrów RNFL okołotarczkowego, może spowodować, że klinicyści przeoczą czynniki zakłócające, takie jak wysoka krótkowzroczność (112). W systemach typu „czarna skrzynka” mogą również pojawiać się błędy związane z zestawami danych, co pogłębia rozbieżności diagnostyczne (113). Aby ograniczyć błędy związane ze sztuczną inteligencją, niezbędny pozostaje udział i nadzór obserwatorów ludzkich. Ponadto konieczne jest ustanowienie jasnych ram w celu zrównoważenia obowiązków nadzorczych lekarzy, odpowiedzialności twórców oprogramowania oraz uprawnień kierownictwa instytucji (114).

6 Kierunki przyszłych badań

Przyszłe badania nad diagnostyką wysokiej krótkowzroczności powinny koncentrować się na kilku kluczowych obszarach w celu poprawy wykrywalności i zarządzania. Postępy w technologii obrazowania — takie jak tomografia optyczna koherencyjna (OCT) o wyższej rozdzielczości, nowatorskie zastosowania angiografii OCT oraz nowe techniki, takie jak obrazowanie fotoakustyczne — będą miały kluczowe znaczenie. Wysiłki mogą obejmować poprawę zdolności OCT do

wykrywanie wczesnych zmian w twardówce i naczyniówce, które nadal są słabo scharakteryzowane w przypadku wysokiego krótkowzroczności (115, 116).

Kolejnym priorytetem jest odkrycie i walidacja biomarkerów diagnostycznych. Badane są takie parametry, jak grubość naczyniówki, mikrokrążenie siatkówki i markery genetyczne. Inicjatywy takie jak projekt China Alliance of Research in High Myopia (CHARM) mają na celu ilościowe określenie biomarkerów — w tym mozaiki dna oka, cech głowy nerwu wzrokowego i parametrów naczyniowych — przy użyciu obrazowania multimodalnego i danych genetycznych (7). Biomarkery te mogą ułatwić wczesną diagnostykę, przewidzieć postęp choroby i pomóc w dostosowaniu leczenia do indywidualnych potrzeb pacjenta.

Badania genetyczne będą nadal miały zasadnicze znaczenie. Identyfikacja dodatkowych mutacji związanych z wysoką krótkowzrocznością i wyjaśnienie ich funkcji może ujawnić nowe mechanizmy patologiczne i wesprzeć strategię badań genetycznych.

Konieczny jest również dalszy rozwój sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego (ML). Chociaż sztuczna inteligencja wykazała potencjał w analizie obrazów, przyszłe prace powinny mieć na celu udoskonalenie algorytmów pod kątem ich ogólnego zastosowania w różnych populacjach oraz integrację narzędzi AI z procesami klinicznymi.

Wkład autorów

SZ: Pisanie – pierwotny projekt. JC: Pisanie – pierwotny projekt. HLY: Pisanie – recenzja i edycja. HPY: Pisanie – recenzja i edycja.

Finansowanie

Autorzy oświadczyli, że otrzymali wsparcie finansowe na realizację niniejszej pracy i/lub jej publikację. Narodowa Fundacja Nauk Przyrodniczych

Referencje

- Ostrin LA, Sah RP, Queener HM, Patel NB, Tran R, Shukla D, et al. Krótkotrwałe rozogniskowanie krótkowzroczne i grubość naczyniówki u dzieci i dorosłych. *Invest Ophthalmol Visual Sci.* (2024) 65:22. doi: 10.1167/iavs.65.4.22
- Sankaridurg P, Berntsen DA, Bullimore MA, Cho P, Flitcroft I, Gawne TJ, et al. IMI 2023 digest. *Invest Ophthalmol Visual Sci.* (2023) 64:7. doi: 10.1167/iavs.64.6.7
- Mark AB, Noel AB. Kontrola krótkowzroczności: dlaczego każda dioptria ma znaczenie. *Optom Vis Sci.* (2019) 96:463–5. doi: 10.1097/OPX.0000000000001367
- Flitcroft DI, He M, Jonas JB, Jong M, Naidoo K, Ohno-Matsui K, et al. IMI – definiowanie i klasyfikacja krótkowzroczności: proponowany zestaw standardów dla badań klinicznych i epidemiologicznych. *Invest Ophthalmol Visual Sci.* (2019) 60:M20–30. doi: 10.1167/iavs.18-25957
- Brien AH, Timothy RF, David AW, Monica J, Kovin SN, Padmaja S, et al. Globalna częstość występowania krótkowzroczności i wysokiej krótkowzroczności oraz trendy czasowe w latach 2000–2050. *Ophthalmology.* (2016) 123:1036–42. doi: 10.1016/j.optha.2016.01.006
- Ohno-Matsui K, Lai TYY, Lai C-C, Cheung CMG. Aktualności dotyczące krótkowzroczności patologicznej. *Prog Retinal Eye Res.* (2016) 52:156–87. doi: 10.1016/j.preteyeres.2015.12.001
- He HL, Liu YX, Song H, Xu TZ, Wong TY, Jin ZB. Utworzenie Chińskiego Sojuszu Badań nad Wysoką Krótkowzrocznością (CHARM): protokół dotyczący opartego na sztucznej inteligencji multimodalnego biobanku badań nad wysoką krótkowzrocznością. *BMJ Open.* (2023) 13:e076418. doi: 10.1136/bmjopen-2023-076418
- Bowd C, Belghith A, Christopher M, Araie M, Iwase A, Tomita G, et al. Wykrywanie jaskry w oczach krótkowzrocznych przy użyciu obszarów zainteresowania opartych na autoenkoderze głębokiego uczenia. *Front Ophthalmol (Lozanna).* (2025) 5:1624015. doi: 10.3389/fopht.2025.1624015
- Arlanzon-Lope P, Campos MA, Fernandez-Bueno I, Coco-Martin RM. Czy PLEX[®] elite 9000 OCT identyfikuje i charakteryzuje większość zmian w tylnym biegunie u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością? *J Clin Med.* (2023) 12:1846. doi: 10.3390/jcm12051846

(82070956). Projekt inkubacji nowych technologii okulistycznych Chińskiego Stowarzyszenia Szpitali Badawczych (Y2025FH-YKYSJSJ07-12).

Konflikt interesów

Autorzy oświadczyli, że niniejsza praca została przeprowadzona bez żadnych powiązań handlowych lub finansowych, które mogłyby zostać uznane za potencjalny konflikt interesów.

Oświadczenie dotyczące generatywnej sztucznej inteligencji

Autorzy oświadczyli, że podczas tworzenia niniejszego manuskryptu nie wykorzystano generatywnej sztucznej inteligencji.

Wszelkie teksty alternatywne (alt text) zamieszczone obok ilustracji w niniejszym artykule zostały wygenerowane przez Frontiers przy wsparciu sztucznej inteligencji i dołożono wszelkich starań, aby zapewnić ich dokładność, w tym poprzez weryfikację przez autorów, tam gdzie to możliwe. W przypadku stwierdzenia jakichkolwiek nieprawidłowości prosimy o kontakt.

Uwaga wydawcy

Wszystkie twierdzenia zawarte w niniejszym artykule są wyłącznie twierdzeniami autorów i nie muszą odzwierciedlać opinii organizacji, z którymi są oni powiązani, ani opinii wydawcy, redaktorów i recenzentów. Żaden produkt, który może być oceniany w niniejszym artykule, ani żadne twierdzenie, które może być przedstawione przez jego producenta, nie jest gwarantowane ani popierane przez wydawcę.

- Baird PN, Saw S-M, Lanca C, Guggenheim JA, Smith Iii EL, Zhou X, et al. Krótkowzroczność. *Nat Rev Dis Primers.* (2020) 6:99. doi: 10.1038/s41572-020-00231-4
- Katie MW, Virginie JMV, Philippa C, Geir B, Christian W, Gabriëlle HSB, et al. Częstość występowania wad refrakcji w Europie: Konsorcjum Europejskiej Epidemiologii Oka (E(3)). *Eur J Epidemiol.* (2015) 30:305–15. doi: 10.1007/s10654-015-0010-0
- Barac A, Oveneri-Ogbomo G, Osuagwu UL, Ekpenyong BN, Agho K, Ekure E, et al. Systematyczny przegląd i metaanaliza częstości występowania krótkowzroczności wśród afrykańskich dzieci w wieku szkolnym. *PLoS One.* (2022) 17:e0263335. doi: 10.1371/journal.pone.0263335
- Ohno-Matsui K, Wu P-C, Yamashiro K, Vutipongsatorn K, Fang Y, Cheung CMG, et al. IMI pathologic myopia. *Invest Ophthalmol Visual Sci.* (2021) 62:5. doi: 10.1167/iavs.62.5.5
- Jiang X, Tarczy-Hornoch K, Cotter SA, Matsumura S, Mitchell P, Rose KA, et al. Związek krótkowzroczności rodziców z wyższym ryzykiem wystąpienia krótkowzroczności u dzieci wieloletnich w wieku przedszkolnym. *JAMA Ophthalmol.* (2020) 138:501–9. doi: 10.1001/jamaophthol.2020.0412
- Jinghong L, Yingqi P, Jiaqi C, Meiling L, Bowen O, Zhenge J, et al. Globalna częstość występowania, trendy i prognozy dotyczące krótkowzroczności u dzieci i młodzieży w latach 1990–2050: kompleksowy przegląd systematyczny i metaanaliza. *Br J Ophthalmol.* (2024) 109:362–71. doi: 10.1136/bjo-2024-325427
- Williams KM, Hammond CJ. Perspektywy dotyczące czynników genetycznych i środowiskowych w krótkowzroczności, jej przewidywania i przyszłego kierunku badań. *Invest Ophthalmol Visual Sci.* (2025) 66:4. doi: 10.1167/iavs.66.7.4
- Lu Y, Yi-Ming G, Yi-Xin C, Junhan W, Juan H, Jiejing B, et al. Sekwencjonowanie całego eksomu w oparciu o trio ujawnia mutacje we wczesnej postaci wysokiej krótkowzroczności. *BMJ Open Ophthalmol.* (2024) 9:e001720. doi: 10.1136/bmjophth-2024-001720

18. Wang Y, Xiao X, Li X, Yi Z, Jiang Y, Zhang F, et al. Genetyczny i kliniczny obraz MYP26 związanego z ARR3: najczęstsza przyczyna mendelowskiej wczesnej wysokiej krótkowzroczności o unikalnym dziedziczeniu. *Br J Ophthalmol*. (2023) 107:1545–53. doi: 10.1136/bjo-2022-321511
19. Yuan J, Zhuang YY, Liu X, Zhang Y, Li K, Chen ZJ, et al. Badanie asocjacyjne całego eksomu identyfikuje mutacje KDELR3 w skrajnej krótkowzroczności. *Nat Commun*. (2024) 15:6703. doi: 10.1038/s41467-024-50580-x
20. Du R, Ohno-Matsui K. Nowe zastosowania i wyzwania związane ze sztuczną inteligencją w diagnostyce i leczeniu oczu z wysoką krótkowzrocznością i krótkowzrocznością patologiczną. *Diagnostyka*. (2022) 12:1210. doi: 10.3390/diagnostics12051210
21. Zhao Y, Hu G, Yan Y, Wang Z, Liu X, Shi H. Analiza biomechaniczna chorób oczu i metody badań *in vitro*. *BioMed Eng Online*. (2022) 21:49. doi: 10.1186/s12938-022-01019-1
22. Wong YL, Saw SM. Epidemiologia patologicznej krótkowzroczności w Azji i na świecie. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. (2016) 5:394–402. doi: 10.1097/APO.0000000000000234
23. Liang R, Yang R, Ai B, Li T, Wang L, Zhou X. Zmiany strukturalne w siatkówce i naczyniówce u pacjentów z różnym stopniem krótkowzroczności. *Sci Rep*. (2024) 14:31033. doi: 10.1038/s41598-024-82142-y
24. Deng J, Xu X, Pan CW, Wang J, He M, Zhang B, et al. Makulopatia krótkowzroczna u chińskich dzieci z wysoką krótkowzrocznością i jej związek ze zmianami w naczyniówce i siatkówce: badanie SCALE-HM. *Br J Ophthalmol*. (2024) 108:720–8. doi: 10.1136/bjo-2022-321839
25. Liu R, Xuan M, Wang DC, Xiao O, Guo XX, Zhang J, et al. Wykorzystanie grubości naczyniówki do wykrywania zwyrodnienia plamki żółtej spowodowanego krótkowzrocznością. *Int J Ophthalmol*. (2024) 17:317–23. doi: 10.18240/ijo.2024.02.14
26. Mérida S, Villar VM, Navea A, Desco C, Sancho-Tello M, Peris C, et al. Brak równowagi między stresem oksydacyjnym a czynnikami wzrostu w wysokiej krótkowzroczności u ludzi. *Front Physiol*. (2020) 11:463. doi: 10.3389/fphys.2020.00463
27. Wang J, Kunikata H, Yasuda M, Himori N, Nitta F, Nakazawa T. Poziom ogólnoustrojowy stresu oksydacyjnego jako czynnik patologiczny i prognostyczny w neowaskularyzacji naczyniówki w krótkowzroczności. *Ophthalmol Sci*. (2024) 4:100550. doi: 10.1016/j.xops.2024.100550
28. Świerczyńska M, Tronina A, Smędowski A. Zrozumienie rozwoju zaćmy w krótkowzroczności osiowej: wpływ stresu oksydacyjnego i powiązanych szlaków. *Redox Biol*. (2025) 80:103495. doi: 10.1016/j.redox.2025.103495
29. Chan TC, Wilkinson Berka JL, Deliyanti D, Hunter D, Fung A, Liew G, et al. Rola reaktywnych form tlenu w patogenie i leczeniu chorób siatkówki. *Exp Eye Res*. (2020) 201:108255. doi: 10.1016/j.exer.2020.108255
30. Qi Z, Qi J, Zhang Y, Wang Y, Feng Y, Yang Z, et al. Profil metaboliczny osocza z wykorzystaniem uczenia maszynowego ujawnia wyraźne cechy diagnostyczne i biologiczne patologicznej krótkowzroczności. *Adv Sci (Weinh)*. (2025) 12:e05861. doi: 10.1002/advs.202505861
31. Francisco BM, Salvador M, Amparo N. Stres oksydacyjny w krótkowzroczności. *Oxid Med Cell Longev*. (2015) 2015:750637. doi: 10.1155/2015/750637
32. Hayashi H, Yamashiro K, Nakanishi H, Nakata I, Kurashige Y, Tsujikawa A, et al. Związek między 15q14 i 15q25 a wysoką krótkowzrocznością u Japończyków. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. (2011) 52:4853–8. doi: 10.1167/iovs.11-7311
33. Oishi M, Yamashiro K, Miyake M, Akagi-Kurashige Y, Kumagai K, Nakata I, et al. Związek między genami ZIC2, RASGRF1 i SHISA6 a wysoką krótkowzrocznością u Japończyków. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. (2013) 54:7492–7. doi: 10.1167/iovs.13-12825
34. Hosoda Y, Yoshikawa M, Miyake M, Tabara Y, Shimada N, Zhao W, et al. CCDC102B zwiększa ryzyko słabego widzenia i ślepoty w przypadku wysokiej krótkowzroczności. *Nat Commun*. (2018) 9:1782. doi: 10.1038/s41467-018-03649-3
35. Liu Y, Zhao K, Luo L, Zhang Z, Qian Z, Jiang C, et al. Diagnostowanie patologicznej krótkowzroczności poprzez identyfikację wzorców morfologicznych przy użyciu obrazów ultrasonograficznych z wykorzystaniem głębokiego uczenia się. *NPJ Digit Med*. (2025) 8:435. doi: 10.1038/s41746-025-01849-y
36. Lei CS, Jiang X, Yang X, Wang Q, Li K, Ning R, et al. Powtarzalność i odtwarzalność pomiarów przedniego odcinka oka za pomocą nowego pełnozakresowego SS-OCT i porównanie z AS-OCT. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. (2025) 55:104763. doi: 10.1016/j.pdpdt.2025.104763
37. Maria Vittoria C, Luisa P, Marco G, Francesco B. Optyczna tomografia koherencyjna a krótkowzroczność patologiczna: aktualizacja literatury. *Int Ophthalmol*. (2015) 35:897–902. doi: 10.1007/s10792-015-0118-y
38. Sampson DM, Dubis AM, Chen FK, Zawadzki RJ, Sampson DD. W kierunku standaryzacji angiografii optycznej tomografii koherencyjnej siatkówki: przegląd. *Light Sci Appl*. (2022) 11:63. doi: 10.1038/s41377-022-00740-9
39. Tomi A, Ștefan I. Charakterystyka angiograficzna neowaskularyzacji naczyniówki związanej z patologiczną krótkowzrocznością. *Rom J Ophthalmol*. (2020) 64:356–63. doi: 10.22336/rjo.2020.57
40. Asma K, Yassin O, Cyrine L, Racem C, Saker B, Afef M. Analiza porównawcza angiografii OCT i angiografii fluoresceinowej w obrazowaniu retinopatii cukrzycowej: nowe spostrzeżenia diagnostyczne. *Eur J Ophthalmol*. (2025) 36:58–66. doi: 10.1177/11206721251367571
41. Milani P, Setaccioli M, Selvi F, Tremolada G, Cammarata G, Criscuolo A, et al. Kolorowa angiografia OCT wideo w przypadku neowaskularyzacji naczyniówki u krótkowzrocznych. *Ophthalmol Retina*. (2025) 9:232–42. doi: 10.1016/j.oret.2024.09.009
42. Hull S, Arno G, Ku CA, Ge Z, Waseem N, Chandra A, et al. Wyniki badań molekularnych i klinicznych u pacjentów z zespołem Knoblocha. *JAMA Ophthalmol*. (2016) 134:753–62. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2016.1073
43. Feo A, De Simone L, Cimino L, Angi M, Romano MR. Diagnostyka różnicowa krótkowzrocznej neowaskularyzacji naczyniówki (mCNV): wnioski z obrazowania multimodalnego i implikacje terapeutyczne. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. (2024) 262:2005–26. doi: 10.1007/s00417-023-06320-w
44. Ohno-Matsui K, Kawasaki R, Jonas JB, Cheung CM, Saw SM, Verhoeven VJ, et al. Międzynarodowy system klasyfikacji i oceny fotograficznej makulopatii krótkowzrocznej. *Am J Ophthalmol*. (2015) 159:877–83.e7. doi: 10.1016/j.ajao.2015.01.022
45. Ruiz-Medrano J, Flores-Moreno I, Ohno-Matsui K, Cheung CMG, Silva R, Ruiz-Moreno JM. WALIDACJA NOWO OPRACOWANEGO SYSTEMU KLASYFIKACJI I OCENY ATN DLA MAKULOPATII Krótkowzrocznej. *Retina*. (2020) 40:2113–8. doi: 10.1097/IAE.00000000000002725
46. Gohil R, Sivaprasad S, Han LT, Mathew R, Kiousis G, Yang Y. Myopic foveoschisis: przegląd kliniczny. *Eye (Lond)*. (2015) 29:593–601. doi: 10.1038/eye.2014.311
47. Cheng D, Chen Q, Wu Y, Yu X, Shen M, Zhuang X, et al. Gęstość naczyń głębokich okołobłędnikowych jako wskaźnik utraty naczyń włosowatych w wysokiej krótkowzroczności. *Eye*. (2019) 33:1961–8. doi: 10.1038/s41433-019-0573-1
48. Gu SZ, Chang S. Krótkowzroczność patologiczna. *Adv Exp Med Biol*. (2025) 1467:281–3. doi: 10.1007/978-3-031-72230-1_54
49. Fan Y, Xie B, Chen L, Wu M, Lin L, Wang Z, et al. Wstępne spostrzeżenia dotyczące metabolomiki surowicy w zanikowej makulopatii krótkowzrocznej: potencjalny związek z zaburzeniami metabolizmu kwasów tłuszczowych. *BMC Ophthalmol*. (2025) 25:392. doi: 10.1186/s12886-025-04220-7
50. Jonas JB, Kutscher JN, Panda-Jonas S, Hayreh SS. Grubość blaszki sitowej korelowała z grubością tylnej części twardówki i długością osiową u małp. *Acta Ophthalmol*. (2016) 94:e693–e6. doi: 10.1111/aos.13070
51. Grytz R, Yang H, Hua Y, Samuels BC, Sigal IA. Przebudowa tkanki łącznej w krótkowzroczności i jej potencjalna rola w zwiększeniu ryzyka jaskry. *Curr Opin BioMed Eng*. (2020) 15:40–50. doi: 10.1016/j.cobme.2020.01.001
52. Jnawali A, Mirhajianmoghadam H, Musial G, Porter J, Ostrin LA. Głowa nerwu wzrokowego, blaszka sitowa i warstwa włókien nerwowych u dzieci bez krótkowzroczności i z krótkowzrocznością. *Exp Eye Res*. (2020) 195:108041. doi: 10.1016/j.exer.2020.108041
53. Jiravarnsirikul A, Belghith A, Rezapour J, Bowd C, Moghimi S, Jonas JB, et al. Ocena jaskry w oczach krótkowzrocznych: wyzwania i możliwości. *Survey Ophthalmology*. (2025) 70:563–82. doi: 10.1016/j.survophthal.2024.12.003
54. Akashi A, Kanamori A, Ueda K, Inoue Y, Yamada Y, Nakamura M. Zdolność SD-OCT do rozróżnienia wczesnej jaskry z wysoką krótkowzrocznością od kontroli z wysoką krótkowzrocznością i kontroli bez wysokiej krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. (2015) 56:6573–80. doi: 10.1167/iovs.15-17635
55. Chauhan BC, O'Leary N, AlMobarak FA, Reis ASC, Yang H, Sharpe GP, et al. Ulepszone wykrywanie jaskry z otwartym kątem przesączania dzięki anatomicznie dokładnemu parametrowi obręczy nerwowo-siatkówkowej uzyskanemu za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej. *Ophthalmology*. (2013) 120:535–43. doi: 10.1016/j.ophtha.2012.09.055
56. Park DY, Lee EJ, Han JC, Kee C. Zastosowanie reguły ISNT z wykorzystaniem BMO-MRW do rozróżnienia między oczami zdrowymi a dotkniętymi jaskrą. *J Glaucoma*. (2018) 27:610–6. doi: 10.1097/IJG.0000000000000970
57. Çelik G, Sarıcaoğlu MS. Wyzwania związane z diagnozowaniem jaskry w przypadkach krótkowzroczności oraz istotna rola minimalnej szerokości otworu błony Brucha w diagnostyce jaskry krótkowzrocznej. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. (2025) 52:104519. doi: 10.1016/j.pdpdt.2025.104519
58. Malik R, Belliveau AC, Sharpe GP, Shuba LM, Chauhan BC, Nicoletta MT. Dokładność diagnostyczna optycznej tomografii koherencyjnej i skanującej tomografii laserowej w rozpoznawaniu jaskry w oczach krótkowzrocznych. *Ophthalmology*. (2016) 123:1181–9. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.01.052
59. Sastre-Ibañez M, Martínez-de-la-Casa JM, Rebolleda G, Cifuentes-Canorea P, Nieves-Moreno M, Morales-Fernandez L, et al. Przydatność parametrów głowy nerwu wzrokowego opartych na otwarciu błony Brucha u osób z krótkowzrocznością. *Eur J Ophthalmol*. (2018) 28:42–6. doi: 10.5301/ejo.5001022
60. Rebolleda G, Casado A, Oblanca N, Muñoz-Negrete FJ. Nowa klasyfikacja otworu błony Brucha – minimalna szerokość otworu poprawia specyficzność optycznej tomografii koherencyjnej w przypadku pochyłonych tarcz. *Clin Ophthalmol*. (2016) 10:2417–25. doi: 10.2147/OPHT.120237
61. Park DH, Kook KY, Kang YS, Piao H, Sung MS, Park SW. Przydatność kliniczna otwarcia błony Brucha – minimalnej szerokości otworu w wykrywaniu wczesnej jaskry w oczach krótkowzrocznych. *J Glaucoma*. (2021) 30:971–80. doi: 10.1097/IJG.0000000000001934
62. Rezapour J, Walker E, Belghith A, Bowd C, Fazio MA, Jiravarnsirikul A, et al. Dokładność diagnostyczna parametrów OCT głowy nerwu wzrokowego i plamki żółtej w wykrywaniu jaskry w oczach z wysoką krótkowzrocznością osiową i bez niej. *Am J Ophthalmol*. (2024) 266:77–91. doi: 10.1016/j.ajao.2024.04.022
63. Miki A, Ikuno Y, Asai T, Usui S, Nishida K. Uszkodzenia blaszki sitowej w wysokiej krótkowzroczności i jaskrze. *PLoS One*. (2015) 10:e0137909. doi: 10.1371/journal.pone.0137909
64. Han JC, Cho SH, Sohn DY, Kee C. Charakterystyka wad blaszki sitowej w oczach krótkowzrocznych z jaskrą z otwartym kątem przesączania i bez niej. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. (2016) 57:486–94. doi: 10.1167/iovs.15-17722
65. Zhou N, Yoshida T, Sugisawa K, Yoshimoto S, Ohno-Matsui K. Wzajemne oddziaływanie między zanikiem okołotarczowym strefy g a parametrami tarczy nerwu wzrokowego w centralnym polu widzenia

Upośledzenie wzroku w przypadku oczu z wysoką krótkowzrocznością. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* (2025) 66:74. doi: 10.1167/iovs.66.6.74

66. Hong RK, Kim JH, Toh G, Na KI, Seong M, Lee WJ. Skuteczność diagnostyczna angiografii optycznej tomografii koherencyjnej szerokokątowej w przypadku jaskry z wysoką krótkowzrocznością. *Sci Rep.* (2024) 14:367. doi: 10.1038/s41598-023-49542-y

67. Chang PY, Wang JY, Wang JK, Huang TL, Hsu YR. Angiografia optyczna tomografii koherencyjnej w porównaniu z optyczną tomografią koherencyjną w wykrywaniu wczesnej jaskry z wysoką krótkowzrocznością. *Front Med (Lozanna).* (2021) 8:793786. doi: 10.3389/fmed.2021.793786

68. Tong Y, Wang T, Zhang X, He Y, Jiang B. Ocena zmian struktury okołotarczkowej i plamki żółtej w jaskrze przedperymetrycznej, wczesnej jaskrze perymetrycznej i nadciśnieniu ocznym za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Front Med (Lozanna).* (2021) 8:696004. doi: 10.3389/fmed.2021.696004

69. Du KH, Kamalipour A, Moghimi S. Centralne pole widzenia w jaskrze: aktualny przegląd. *Taiwan J Ophthalmol.* (2024) 14:360–70. doi: 10.4103/tjo.TJO-D-24-00042

70. Maddess T, Carle CF, Kolic M, Saraç O, Essex RW, Rohan EMF, et al. Zdolność diagnostyczna i powtarzalność obiektywnej perymetrii w jaskrze. *J Glaucoma.* (2024) 33:940–50. doi: 10.1097/IJG.0000000000002485

71. Hurst J, Johnson D, Law C, Schweitzer K, Sharma S. Znaczenie subiektywnego pogorszenia widzenia u pacjentów z ostrym wystąpieniem mętów i/lub błysków. *Can J Ophthalmol.* (2015) 50:265–8. doi: 10.1016/j.cjco.2015.06.001

72. Kousha O, Ganesanathan S, Shahin B, Ellis J, Blaikie A. Ocena porównawcza nowego, ekonomicznego, dwuokularowego oftalmoskopu pośredniego. *Eye (Lond).* (2023) 37:160–2. doi: 10.1038/s41433-021-01901-7

73. Solyman O, Aref A, Abo Obaia AS, Kamel HF, Al-Muhyalib A. Całkowicie cyfrowy, dwuokularowy, pośredni wirtualny oftalmoskop wideo: nowatorskie podejście do badania siatkówki i fotografii. *Clin Ophthalmol.* (2022) 16:3905–9. doi: 10.2147/OPHT.S393892

74. Soliman AZ, Silva PS, Aiello LP, Sun JK. Obrazowanie siatkówki w ultra szerokim polu widzenia w wykrywaniu, klasyfikacji i leczeniu retinopatii cukrzycowej. *Semin Ophthalmol.* (2012) 27:221–7. doi: 10.3109/08820538.2012.708812

75. Tang Y, Chen Q, Mengyuan L, Saisai Z, Jinglin Z. Kliniczne zastosowanie ultraszerokokątnego oftalmoskopu laserowego w retinopatii obwodowej u pacjentów z krótkowzrocznością. *Yan Ke Xue Bao.* (2019) 34:6. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2019.06.02

76. Guo Y, Yan H, Guo C, Wang J. Analiza porównawcza dwóch pęknięć siatkówki za pomocą systemów fotografii dna oka o ultraszerokim kącie widzenia. *BioMed Rep.* (2024) 20:34. doi: 10.3892/br.2024.1722

77. Klaas JE, Siedlecki J, Steel DH, Laidlaw DAH, Prigler S. Jak należy opisywać stan plamki żółtej w oczach z odwarstwieniem siatkówki typu „macula-off”? *Eye (Lond).* (2023) 37:228–34. doi: 10.1038/s41433-022-02074-7

78. Zaidi H, Sridhar J. Optyczna tomografia koherencyjna w odwarstwieniu siatkówki: biomarkery prognostyczne, planowanie chirurgiczne i monitorowanie pooperacyjne. *Diagnostics (Basel).* (2025) 15:871. doi: 10.3390/diagnostics15070871

79. Chang KJ, Wang CY, Wu HY, Weng PY, Lu CH, Chiu W, et al. Wykorzystanie biomarkerów ultrasonografii tętnic szyjnych i wielogenowego wskaźnika ryzyka jako nowatorskiej metody badań przesiewowych w kierunku odwarstwienia siatkówki. *Transl Vis Sci Technol.* (2025) 14:16. doi: 10.1167/tvst.14.4.16

80. Yui F, MacCormick IJC, Strang N, Bernabeu MO, MacGillivray T. Odchylenie refrakcji dna oka jako spersonalizowany biomarker 12-letniego ryzyka odwarstwienia siatkówki. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* (2025) 66:1. doi: 10.1167/iovs.66.9.1

81. Ng Yin Ling C, Zhu X, Ang M. Sztuczna inteligencja w krótkowzroczności u dzieci: aktualne trendy i kierunki rozwoju. *Curr Opin Ophthalmology.* (2024) 35:463–71. doi: 10.1097/ICU.0000000000001086

82. Li Y, Feng W, Zhao X, Liu B, Zhang Y, Chi W, et al. Opracowanie i walidacja systemu głębokiego uczenia się do wykrywania schorzeń zagrażających wzroku w przypadku wysokiej krótkowzroczności przy użyciu obrazów optycznej tomografii koherencyjnej. *Br J Ophthalmol.* (2022) 106:633–9. doi: 10.1136/bjophthalmol-2020-317825

83. Sogawa T, Tabuchi H, Nagasato D, Masumoto H, Ikuno Y, Ohsugi H, et al. Dokładność głębokiej konwolucyjnej sieci neuronowej w wykrywaniu krótkowzrocznych chorób plamki żółtej za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej z przemiatanym źródłem. *PLoS One.* (2020) 15:e0227240. doi: 10.1371/journal.pone.0227240

84. Tan TE, Anees A, Chen C, Li S, Xu X, Li Z, et al. Algorytmy głębokiego uczenia oparte na zdjęciach siatkówki w leczeniu krótkowzroczności oraz platforma blockchain ułatwiająca badania medyczne w zakresie sztucznej inteligencji: retrospektywne badanie wielokohortowe. *Lancet Digit Health.* (2021) 3:e317–e29. doi: 10.1016/S2589-7500(21)00055-8

85. Zhang J, Xiao F, Zou H, Feng R, He J. Metoda głębokiego uczenia się wzbogacona o samokontrolujące się uczenie się, służąca do identyfikacji makulopatii krótkowzrocznej u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością. *iScience.* (2024) 27:110566. doi: 10.1016/j.isci.2024.110566

86. Yang AS, Wang HS, Li TJ, Liu CH, Chen CM. Diagnostyka wczesnej jaskry prawdopodobnie połączonej z wysoką krótkowzrocznością poprzez integrację mapy grubości OCT oraz standardowych automatycznych i pulsarowych perymetrów. *Sci Rep.* (2025) 15:13614. doi: 10.1038/s41598-025-97883-7

87. Ran AR, Wang X, Chan PP, Chan NC, Yip W, Young AL, et al. Trójwymiarowy model głębokiego uczenia się do wykrywania neuropatii jaskrowej i cech krótkowzroczności na podstawie skanów optycznej tomografii koherencyjnej: retrospektywne badanie wielośrodkowe. *Front Med (Lozanna).* (2022) 9:860574. doi: 10.3389/fmed.2022.860574

88. Bowd C, Belghith A, Rezapour J, Christopher M, Hyman L, Jonas JB, et al. Dokładność diagnostyczna mapy grubości plamki żółtej i obrazów tekstury en face w wykrywaniu jaskry w oczach z wysoką krótkowzrocznością osiową. *Am J Ophthalmol.* (2022) 242:26–35. doi: 10.1016/j.ajo.2022.04.019

89. Sharma S, Braeu FA, Chuangsuanich T, Tun TA, Hoang QV, Chong R, et al. Trójwymiarowy fenotyp strukturalny głowy nerwu wzrokowego w jaskrze i krótkowzroczności – klucz do poprawy diagnostyki jaskry w populacjach krótkowzrocznych. *Am J Ophthalmol.* (2026) 281:138–50. doi: 10.1016/j.ajo.2025.09.004

90. Yousefi S, Goldbaum MH, Zangwill LM, Medeiros FA, Bowd C. Rozpoznawanie wzorców utraty pola widzenia za pomocą nienadzorowanego uczenia maszynowego. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.* (2014) 2014:90342M. doi: 10.1117/12.2043145

91. Akter N, Gordon J, Li S, Poon M, Perry S, Fletcher J, et al. Wykrywanie jaskry i określanie jej stadium na podstawie obrazów pola widzenia przy użyciu technik uczenia maszynowego. *PLoS One.* (2025) 20:e0316919. doi: 10.1371/journal.pone.0316919

92. Wang Z, Zou H, Guo Y, Sun M, Zhao X, Wang Y, et al. Myopic-net: bezpośrednia identyfikacja początku i postępu krótkowzroczności oparta na głębokim uczeniu. *Transl Vis Sci Technol.* (2025) 14:38. doi: 10.1167/tvst.14.8.38

93. Liao J, Chen Z, Jin W. Odkrywanie czynników prognostycznych krótkowzroczności u młodzieży: wtórna analiza danych z wykorzystaniem uczenia maszynowego. *Front Med (Lausanne).* (2025) 12:1595320. doi: 10.3389/fmed.2025.1595320

94. Hu M, Jiang Y, Luo Z, Lan W, Dai W. Integracja danych biometrycznych i multimodalnych obrazów w celu wczesnego przewidywania wystąpienia krótkowzroczności. *Sci Rep.* (2025) 15:31416. doi: 10.1038/s41598-025-15605-5

95. Zuo H, Huang B, He J, Fang L, Huang M. Podejścia oparte na uczeniu maszynowym w przypadku wysokiej krótkowzroczności: przegląd systematyczny i metaanaliza. *J Med Internet Res.* (2025) 27:e57644. doi: 10.2196/57644

96. Peng Z, Ma R, Zhang Y, Yan M, Lu J, Cheng Q, et al. Opracowanie i ocena multimodalnej sztucznej inteligencji do diagnozowania i segregacji chorób okulistycznych przy użyciu ChatGPT i obrazów przedniego odcinka oka: protokół dwuetapowego badania przekrojowego. *Front Artif Intell.* (2023) 6:1323924. doi: 10.3389/frai.2023.1323924

97. Zhang HQ, Arif M, Thafar MA, Albaradei S, Cai P, Zhang Y, et al. PMPred-AE: model obliczeniowy do wykrywania i interpretacji patologicznej krótkowzroczności oparty na sztucznej inteligencji. *Front Med (Lozanna).* (2025) 12:1529335. doi: 10.3389/fmed.2025.1529335

98. Gu C, Wang Y, Jiang Y, Xu F, Wang S, Liu R, et al. Zastosowanie systemu sztucznej inteligencji do badań przesiewowych wielu chorób dna oka w chińskich placówkach podstawowej opieki zdrowotnej: rzeczywiste, wielośrodkowe i przekrojowe badanie 4795 przypadków. *Br J Ophthalmol.* (2024) 108:424–31. doi: 10.1136/bjo-2022-322940

99. Lee JY, Sung KR, Yun SC. Porównanie częstości występowania ścięczenia warstwy włókien nerwowych siatkówki u pacjentów z jaskrą bez krótkowzroczności i jaskrą z krótkowzrocznością. *Br J Ophthalmol.* (2016) 100:699–703. doi: 10.1136/bjophthalmol-2015-307343

100. Rizwan Khan AY, Malik MB. Sztuczna inteligencja w okulistyce: praktyczne zastosowania, dowody z podspecjalizacji i wdrożenie w rzeczywistych warunkach. *Cureus.* (2025) 17:e96121. doi: 10.7759/cureus.96121

101. Chiang YY, Chen CL, Chen YH. Ocena głębokiego uczenia się w wykrywaniu jaskry na podstawie zdjęć dna oka w populacjach osób z wysoką krótkowzrocznością. *Biomedicine.* (2024) 12:1394. doi: 10.3390/biomedicine12071394

102. Kashiwagi K, Toyoura M, Mao X, Kawase K, Tanito M, Nakazawa T, et al. Wpływ sztucznej inteligencji na oceny okulistów w przypadku jaskry. *PLoS One.* (2025) 20:e0321368. doi: 10.1371/journal.pone.0321368

103. Chua SY, Sabanayagam C, Cheung YB, Chia A, Valenzuela RK, Tan D, et al. Wiek wystąpienia krótkowzroczności pozwala przewidzieć ryzyko wystąpienia wysokiej krótkowzroczności w późniejszym dzieciństwie u krótkowzrocznych dzieci w Singapurze. *Ophthalmic Physiol Opt.* (2016) 36:388–94. doi: 10.1111/opo.12305

104. Guo H, Tong P, Peng Y, Wang T, Liu Y, Chen J, et al. Homozygotyczna mutacja genu LEPREL1 powodująca utratę funkcji powoduje ciężką niesyndromową wysoką krótkowzroczność z wczesną kataraktą. *Clin Genet.* (2014) 86:575–9. doi: 10.1111/cge.12309

105. Choi KY, Yu WY, Lam CHI, Li ZC, Chin MP, Lakshmanan Y, et al. Narażenie dzieci na ograniczoną przestrzeń życiową: potencjalne zagrożenie środowiskowe dla rozwoju krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt.* (2017) 37:568–75. doi: 10.1111/opo.12397

106. Kelly CJ, Karthikesalingam A, Suleyman M, Corrado G, King D. Kluczowe wyzwania związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w medycynie. *BMC Med.* (2019) 17:195. doi: 10.1186/s12916-019-1426-2

107. Chen IY, Joshi S, Ghassemi M. Leczenie nierówności zdrowotnych za pomocą sztucznej inteligencji. *Nat Med.* (2020) 26:16–7. doi: 10.1038/s41591-019-0649-2

108. Adamson AS, Smith A. Uczenie maszynowe a nierówności w opiece zdrowotnej w dermatologii. *JAMA Dermatol.* (2018) 154:1247–8. doi: 10.1001/jamadermatol.2018.2348

109. Rozhyina A, Somfai GM, Atzori M, DeBuc DC, Saad A, Zoellin J, et al. Badanie publicznie dostępnych zbiorów danych dotyczących optycznej tomografii koherencyjnej: kompleksowy przegląd. *Diagnostics (Basel).* (2024) 14:1668. doi: 10.3390/diagnostics14151668

110. Khan SM, Liu X, Nath S, Korot E, Faes L, Wagner SK, et al. Globalny przegląd publicznie dostępnych zbiorów danych dotyczących obrazowania okulistycznego: bariery dostępu, użyteczności i uogólnialności. *Lancet Digit Health.* (2021) 3:e51–66. doi: 10.1016/S2589-7500(20)30240-5

111. Lin XX, Li MD, Ruan SM, Ke WP, Zhang HR, Huang H, et al. Autonomiczny robotyczny system skanowania ultrasonograficznego: klucz do poprawy powtarzalności analizy obrazu

i spójności obserwacji w obrazowaniu ultrasonograficznym. *Front Robot AI*. (2025) 12:1527686. doi: 10.3389/frobt.2025.1527686

112. Hanif AM, Beqiri S, Keane PA, Campbell JP. Zastosowania interpretowalności w modelach głębokiego uczenia się w okulistyce. *Curr Opin Ophthalmol*. (2021) 32:452–8. doi: 10.1097/ICU.0000000000000780

113. Thaler A, Ong J, Al-Aswad LA. Utrzymanie przejrzystości sztucznej inteligencji w okulistyce: wezwanie do współpracy między środowiskiem akademickim, przemysłem i rządem na rzecz opieki nad pacjentami w XXI wieku. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. (2024) 13:100093. doi: 10.1016/j.apjo.2024.100093

114. Kazemzadeh K. Sztuczna inteligencja w okulistyce: możliwości, wyzwania i kwestie etyczne. *Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol*. (2025) 14:255–72. doi: 10.51329/mehdiophthal1517

115. Jones D, Chow A, Fadel D, Gonzalez Meijome JM, Grzybowski A, Kollbaum P, et al. IMI-instrumentarium do leczenia krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. (2025) 66:7. doi: 10.1167/iavs.66.9.7

116. Ng DS, Cheung CY, Luk FO, Mohamed S, Brelen ME, Yam JC, et al. Postępy w optycznej tomografii koherencyjnej w krótkowzroczności i krótkowzroczności patologicznej. *Eye (Lond)*. (2016) 30:901–16. doi: 10.1038/eye.2016.47