

IMI — Instrumentation for Myopia Management

Deborah Jones,^{1,3} Amy Chow,^{1,3} Daddi Fadel,^{1,2} Jose Manuel Gonzalez Meijome,⁴ Andrzej Grzybowski,^{1,6} Pete Kollbaum,⁷ James Loughman,⁸ oraz James Wolffsohn⁹

¹ Szkoła Optometrii i Nauk o Widzeniu, Uniwersytet Waterloo, Waterloo, Kanada ² Centrum Badań i Edukacji Okulistycznej, Uniwersytet Waterloo, Waterloo, Kanada ³ Centrum Badań nad Okiem i Widzeniem, Specjalny Region Administracyjny Hongkong, Chiny

⁴ CEORLab – Centrum Fizyki Uniwersytetów Minho i Porto, Wydział Nauk Ścisłych, Uniwersytet Minho, Portugalia

⁵ Instytut Badań Okulistycznych, Fundacja Rozwoju Okulistyki, Poznań, Polska

⁶ Katedra Okulistyki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, Polska

⁷ Uniwersytet Indiana, Szkoła Optometrii, Bloomington, IN, Stany Zjednoczone

⁸ Centrum Badań Okulistycznych Irlandii, Uniwersytet Technologiczny w Dublinie, Dublin, Irlandia

⁹ Szkoła Optometrii, Wydział Zdrowia i Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Aston, Birmingham, Wielka Brytania

Korespondencja: Deborah Jones, Szkoła Optometrii i Nauk o Widzeniu, Uniwersytet Waterloo, 200 University Avenue W, Waterloo, Ontario N2L3G1, Kanada; dajones@uwaterloo.ca.

Otrzymano: 28 marca 202/

Zaakceptowano: 22 maja 202/

Opublikowano: 2 lipca 202/

Cytat: Jones D, Chow A, Fadel D, et al. IMI — Instrumentarium do leczenia krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2021;66(9):7. <https://doi.org/10.1167/iov.66.9.7>

Rosnąca częstość występowania krótkowzroczności podkreśla znaczenie wczesnej diagnozy i skutecznych strategii postępowania w celu kontrolowania jej postępu i zapobiegania powikłaniom. Postępy w zakresie oprzyrządowania umożliwiają lekarzom zapewnienie pacjentom zindywidualizowanej opieki opartej na dowodach naukowych. Oprzyrządowanie do kontroli krótkowzroczności obejmuje szeroki zakres technologii przeznaczonych do oceny wad refrakcji, parametrów biometrycznych, w tym długości osiowej, reakcji akomodacyjnych, a także szczegółowej oceny zdrowia oczu. Narzędzia te oferują lekarzom możliwość wyjścia poza tradycyjne techniki kliniczne, zapewniając dokładniejsze, bardziej szczegółowe i powtarzalne pomiary, które mają kluczowe znaczenie dla wykrywania i monitorowania postępu krótkowzroczności. Pozwala to na spersonalizowane podejście do planowania leczenia, umożliwiając wybór i optymalizację interwencji w zakresie kontroli krótkowzroczności. Ponadto zaawansowane obrazowanie i wizualizacja danych w czasie rzeczywistym wspierają edukację pacjentów, sprzyjając zrozumieniu, co może poprawić przestrzeganie planów leczenia. Dzięki zastosowaniu tych technologii lekarze mogą zająć się złożonymi kwestiami związanymi z leczeniem krótkowzroczności, zapewnić precyzyjną i skuteczną opiekę oraz przyczynić się do globalnych wysiłków na rzecz ograniczenia epidemii krótkowzroczności. Włączenie zaawansowanych instrumentów do praktyki klinicznej zachęca do wczesnej interwencji i stosowania strategii leczenia u pacjentów zagrożonych krótkowzrocznością (przedkrótkowzroczność), a także poprawia wyniki leczenia pacjentów z krótkowzrocznością.

Słowa kluczowe: krótkowzroczność, oprzyrządowanie, kontrola krótkowzroczności, leczenie krótkowzroczności

O Instrumenty okulistyczne odgrywają kluczową rolę w pomaganiu lekarzom w leczeniu krótkowzroczności, od oceny dzieci zagrożonych krótkowzrocznością

Oprócz tego są one niezbędne do monitorowania zdrowia i integralności tylnego odcinka oka, biorąc pod uwagę zwiększone ryzyko chorób towarzyszących krótkowzroczności. Odpowiednie instrumenty okulistyczne można ogólnie podzielić na podstawie ich przeznaczenia, aby ocenić optyczne, strukturalne lub funkcjonalne aspekty oka i widzenia, jak pokazano na [rysunku 1](#).

Ogólne definicje dwóch z tych kategorii są następujące:

- Optyczne: parametry i wskaźniki mające bezpośredni wpływ na refrakcję światła (krzywizny, indeksy) i ich konsekwencje (topografia, moc optyczna, refrakcja, aberracje, akomodacja)
- Strukturalne: parametry i wskaźniki określające odległości wewnątrzgałkowe i grubość tkanek (całkowite i częściowe odległości wewnątrzgałkowe, grubości, obrazowanie wewnątrzgałkowe).

Na potrzeby niniejszego artykułu omówienie ogranicza się do instrumentów służących do oceny optycznej i strukturalnej. Nie będą omawiane instrumenty funkcjonalne i multimodalne.

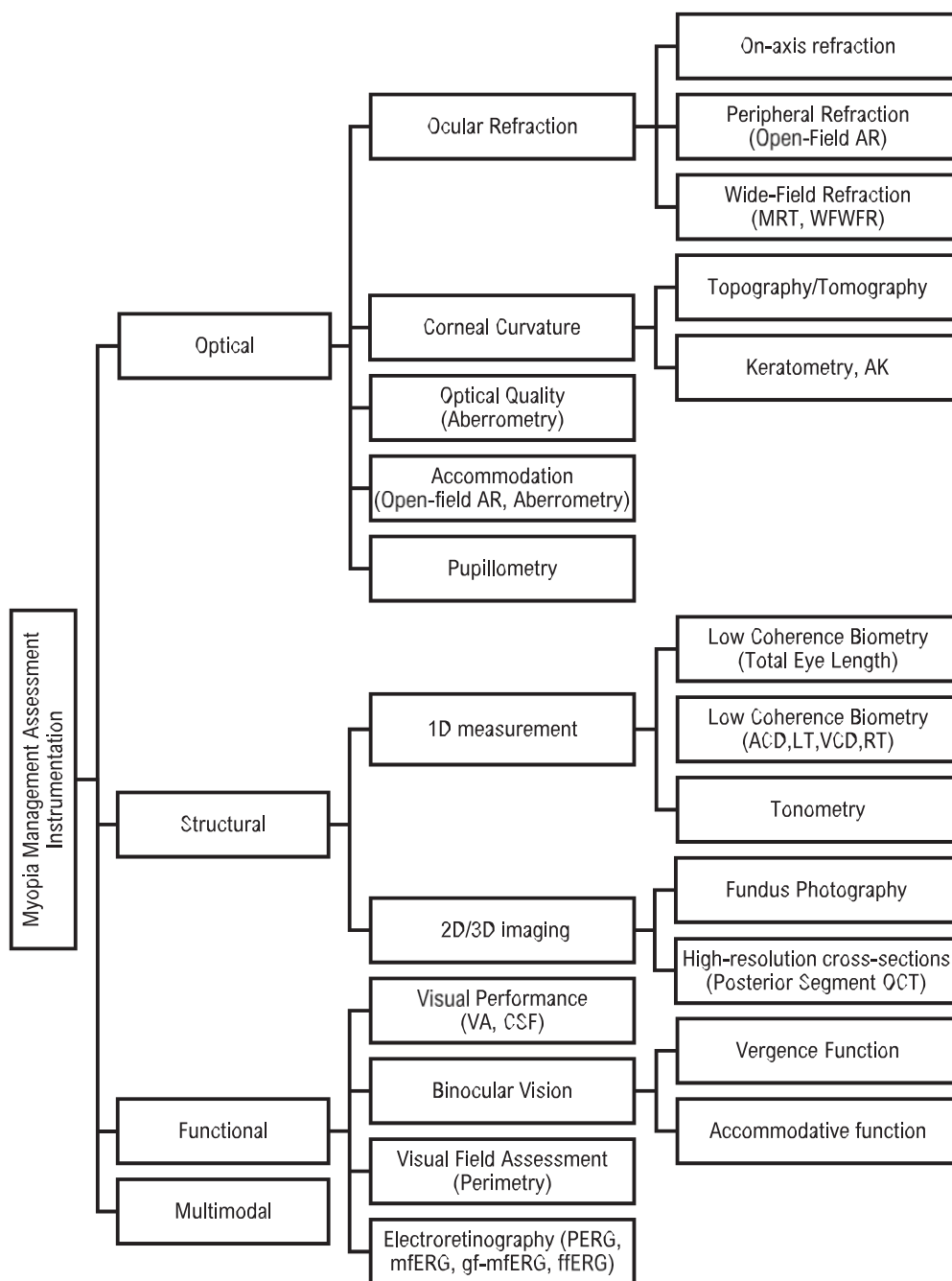
Ocena optyczna:

- Refrakcja oka: uzyskanie refrakcji osiowej i pozaosiowej oka przy użyciu metod obiektywnych lub subiektywnych.
- Krzywizna rogówki (keratometria/topografia/topografia): uzyskanie informacji ilościowych na temat przedniej i tylnej krzywizny rogówki, wysokości, asferyczności i parametrów grubości rogówki.
- Aberrometria: pomiar niedoskonałości optycznych w układzie wzrokowym.
- Pupillometria: pomiar wymiarów źrenicy oraz zmian jej wielkości wywołanych bodźcem, a także zmian spontanicznych.

Ocena strukturalna:

- Wymiarowa: pomiary wewnątrzgałkowe stosowane w szczególności do pomiaru długości osiowej i obwodowej oka za pomocą





RYCINA 1. Klasyfikacja instrumentów wykorzystywanych w leczeniu krótkowzroczności. AC/A, współczynnik konwergencji akomodacyjnej/akomodacji; ACD, głębokość przedniej komory oka; AK, autokeratometria; AR, autorefrakcja; CSF, funkcja czułości kontrastowej; fERG, elektroretinografia pełnopolowa; gf-mfERG, globalna elektroretinografia wieloogniskowa z błyskiem; LT, grubość soczewki; mfERG, wieloogniskowa elektroretinografia; MRT, wielospektralna topografia refrakcji; PERG, wzorcowa elektroretinografia; RT, grubość siatkówki; VA, ostrość wzroku; VCD, głębokość komory szklistej; WFWFR, szerokie pole refrakcji falowej. Choć pokazane na tym rysunku, funkcjonalne i multimodalne oprzyrządowanie nie jest objęte niniejszym artykułem.

jednowymiarowe systemy skanujące, takie jak biometry optyczne o niskiej spójności.

- Obrazowanie: technologie służące do uzyskiwania obrazów struktur oka
 - Fotografia dna oka: do szczegółowej, głównie jakościowej analizy struktur wewnętrznych tylnego odcinka oka, w tym obrazowania siatkówki w szerokim polu widzenia
 - Wysokiej rozdzielczości przekroje tylnego odcinka: analiza ilościowa dwu- lub trójwymiarowych

wymiarowych (3D) przekrojów optycznych siatkówki, naczyniówki i twardówki za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej

- Przedni odcinek: ocena rogówki, przedniej komory i soczewki za pomocą metod jakościowych, takich jak biomikroskop z lampą szczelinową, lub analiza ilościowa za pomocą fotografii/video Scheimpfluga lub optycznej tomografii koherencyjnej (OCT) przedniego odcinka

REFRAKCJA

Refrakcja oka

W okresie dzieciństwa oko wydłuża się, czemu towarzyszą zmiany w rógówce i mocy soczewki. Niedopasowanie długości osiowej oka do mocy optycznej rógówki lub soczewki powoduje wadę refrakcji. Wada refrakcji krótkowzroczności może powstać na kilka sposobów z powodu nadmiernej długości osiowej (krótkowzroczność osiowa), nadmiernej mocy rógówki lub soczewki (krótkowzroczność refrakcyjna).¹

Pomiar wady refrakcji. Wadę refrakcji można zmierzyć za pomocą obiektywnych metod oceniających stan optyczny oka, a także subiektywnych metod uwzględniających percepcyjne aspekty widzenia. Subiektywna refrakcja cykloplegiczna jest uważana za złoty standard w określaniu wady refrakcji, szczególnie w praktyce klinicznej, ponieważ uwzględnia zarówno optykę, jak i percepcję, jednocześnie kontrolując akomodację. Jednakże, ponieważ wymaga ona współpracy i zrozumienia ze strony pacjenta, może nie być odpowiednia dla młodszych dzieci. ^{(2) (-) (4)} W przypadku młodszych dzieci najlepszymi metodami dokładnego określenia wady refrakcji są metody obiektywne, takie jak cykloplegiczna retinoskopia i cykloplegiczna autorefrakcja. W badaniach klinicznych dane uzyskane metodami obiektywnymi są zazwyczaj preferowane i uważane za bardziej powtarzalne, z mniejszym potencjałem subiektywnej zmienności. Zarówno cykloplegiczna retinoskopia, jak i cykloplegiczna autorefrakcja dają zazwyczaj porównywalne wyniki refrakcji, ze średnią różnicą sferyczną wynoszącą 0,0 D. ^{(7) (6)}

Refrakcja cykloplegiczna. Kontrola akomodacji

Podczas badania refrakcji szczególnie ważne jest uwzględnienie tego czynnika w przypadku małych dzieci, u których akomodacja może powodować różnice w pomiarach sięgające nawet 4D.⁷ Niezastosowanie cykloplegii może prowadzić do przeszacowania stopnia krótkowzroczności i ewentualnego błędnego zaklasyfikowania nadwzroczności i emmetropii jako krótkowzroczności.⁸⁻¹⁴ Chociaż bez cykloplegii wada refrakcji może być średnio o 0,6 D–0,8 D większa niż w przypadku cykloplegii u dzieci z krótkowzrocznością,^{11,16} różnica ta jest większa i bardziej zmienna w przypadku dzieci z nadwzrocznością i emmetropią (odpowiednio $1,80 \text{ D} \pm 1,11 \text{ D}$ i $1,26 \text{ D} \pm 0,93 \text{ D}$).⁽¹¹⁾ Refrakcja bez cykloplegii może prowadzić do błędnej klasyfikacji dzieci w wieku od czterech do 1/ lat, przy czym błędy najczęściej występują u młodszych dzieci z większymi wadami refrakcji nadwzroczności i mniejszą długością osiową.¹⁰ Istnieją dowody sugerujące, że cykloplegia powinna być zawsze uwzględniana w badaniach klinicznych pacjentów w wieku do 20 lat; po 20. roku życia różnica między wadami refrakcji z cykloplegią i bez cykloplegii spada poniżej 0,2D.^{8,11}

W praktyce klinicznej dwa najczęściej stosowane środki cykloplegiczne to 1% cyklopentolat i 1% tropikamid. Cyklopentolat ma ogólnie silniejsze działanie cykloplegiczne niż tropikamid, a także charakteryzuje się innym przebiegiem czasowym, przy czym maksymalne działanie osiąga po 60 minutach, w porównaniu z maksymalną cykloplegią w przypadku tropikamidu, która następuje po 30 minutach od podania.¹⁷ Chociaż zgodnie z metaanalizą istnieją niewielkie różnice w działaniu cykloplegicznym między tymi dwoma środkami cykloplegicznymi, różnica ta nie jest ani statystycznie istotna, ani klinicznie znacząca.¹⁸ Tropikamid i cyklopentolat mają podobny wpływ na głębokość przedniej komory oka, grubość soczewki krystalicznej, moc soczewki krystalicznej i głębokość komory szklistej.¹⁹ Ponieważ tropikamid wykazuje podobne działanie cykloplegiczne bez długotrwałego działania rozszerzającego źrenicę, Międzynarodowy Instytut Krótkowzroczności zaleca stosowanie dwóch kropli 1% tropikamidu w odstępie pięciu minut, z pomiarem wady refrakcji po 30 minutach od zakropienia.

⁴ Należy zauważyć, że osiągnięcie całkowitej cykloplegii jest trudniejsze u dzieci z ciemniejszą tęczówką ze względu na efekt sekwestracji pigmentu tęczówki.^{20,21}

W porównaniu z subiektywną refrakcją cykloplegiczną, zarówno retinografia cykloplegiczna, jak i autorefrakcja cykloplegiczna mają tendencję do przeszacowywania mocy sferycznej i cylindrycznej krótkowzroczności oraz niedoszacowywania mocy dalekowzroczności.²² Dokładność retinoskopii zależy w dużym stopniu od umiejętności lekarza.²² W przypadku wykwalifikowanych lekarzy powtarzalność (spójność pomiarów wykonywanych przez tego samego lekarza) i odtwarzalność (spójność pomiarów wykonywanych przez różnych lekarzy) retinoskopii cykloplegicznej może wynosić 0,2/D.²³

Chociaż stosowanie cykloplegii jest preferowane w celu precyzyjnego określenia wady refrakcji, cykloplegia może być niewygodna dla pacjentów ze względu na jej wpływ na wzrok i niewielkie ryzyko reakcji alergicznej.²⁴ Ponadto nie wszyscy okuliści mają uprawnienia do wykonywania refrakcji cykloplegicznej. Praktyczną alternatywą, jeśli nie można wykonać refrakcji cykloplegicznej, jest zastosowanie zamglenia optycznego w celu rozluźnienia akomodacji u młodych pacjentów. Zamglenie przeciwlęgłego oka o 6,00 D u pacjentów w wieku od 7 do 16 lat podczas retinoskopii bez cykloplegii pozwala uzyskać wyniki refrakcji, które są średnio tylko o 0,3 D bardziej krótkowzroczne w porównaniu z retinoskopią cykloplegiczną.²⁵ Jeśli krótkowzroczność została już stwierdzona, stopień zamglenia ma znikomy wpływ na ostateczny wynik refrakcji, więc konwencjonalne zamglenie 2,00 D podczas retinoskopii może być wystarczające.²⁶

Autorefrakcja. Autorefraktory, zarówno zamknięte, jak i otwarte, są szeroko stosowane jako obiektywna metoda pomiaru wad refrakcji i są ogólnie dobrze tolerowane przez większość pacjentów. Urządzenia zamknięte wykorzystują zamknięty obraz docelowy, natomiast modele otwarte pozwalają pacjentom widzieć zewnętrzny cel przez rozdzielacz wiązki, zapewniając naturalne wrażenia wizualne i minimalizując akomodację wywołaną przez instrument.²⁷

Wykorzystanie zamglenia jako techniki rozluźniającej akomodację okazało się nieskuteczne w przypadku autorefraktometrów z zamkniętym polem widzenia, co skutkowało przeszacowaniem krótkowzroczności.²⁸ W przypadku zamglenia wyniki refrakcji uzyskane za pomocą ręcznych i stołowych autorefraktometrów wykazują średnio o 0,60 do 0,80 D większą krótkowzroczność (mniej nadwzroczności) w porównaniu z refrakcją subiektywną.^{10,(11) (16) (29) (-) (31)} Powtarzalność pomiarów przy użyciu zamglenia wynosi w najlepszym przypadku 1,00 D.⁽³²⁾ Różnica między autorefraktometrią z cykloplegią a autorefraktometrią bez cykloplegii jest większa u młodszych dzieci i dzieci z większą nadwzrocznością.¹³ Jednak oczy krótkowzroczne wykazują najmniejsze różnice we wszystkich grupach wiekowych.¹¹ Chociaż urządzenia ręczne umożliwiają pomiary u młodszych dzieci, mają one tendencję do generowania wyników bardziej krótkowzrocznych niż urządzenia stołowe.^{29,30} a przeszacowanie wynosi nawet 2,00 D.³³ Autorefrakcja bez cykloplegii z zamgleniem w urządzeniach z zamkniętym polem nie zapewnia dokładności wymaganej do precyzyjnej diagnozy i najlepiej nadaje się jako wstępny etap przed refrakcją subiektywną. Jednak w przypadku cykloplegii sprawdzone autorefraktometry zapewniają wiarygodne i dokładne pomiary niezależnie od typu urządzenia.³³

Autorefraktory binokularowe z otwartym polem widzenia minimalizują akomodację proksymalną, zapewniając naturalne warunki widzenia z nieograniczonym widokiem odległego celu. Mogą one również mierzyć refrakcję obwodową i generalnie dają mniej krótkowzroczne wyniki w porównaniu z urządzeniami z zamkniętym polem widzenia.³⁴ Jeśli nie można zastosować cykloplegii, autorefraktometry z otwartym polem zapewniają wyniki najbliższe wynikom retinoskopii cykloplegicznej, zwłaszcza u dzieci w wieku od 6 do 11 lat.³⁵ Różnice między pomiarami autorefraktometru z otwartym polem a subiektywną refrakcją binokularową są klinicznie nieistotne (średnia różnica < 0,2/

D) i są wysoce powtarzalne w zakresie 0,2/ dioptrii.^{30,36,(37)} Autorefraktometri z otwartym polem zapewniają dokładniejsze pomiary astygmatyzmu, szczególnie w przypadku osi ukośnych, niż ich odpowiedniki z zamkniętym polem.⁽³⁹⁾ Cykloplegia nie wydaje się mieć znaczącego wpływu na dokładność pomiarów składowych astygmatyzmu.⁽³⁹⁾ Określenie osi uważa się za dokładniejsze w przypadku autorefrakcji niż w przypadku retinoskopii.⁽³⁸⁾

Pomimo zmniejszonej dokładności autorefrakcji bez cykloplegii, może ona być przydatna do celów przesiewowych, szczególnie w przypadku dwuocnych przyrządów z otwartym polem widzenia, które są bardziej skuteczne w dokładnej klasyfikacji krótkowzroczności, dalekowzroczności i wysokiej krótkowzroczności u dzieci w wieku szkolnym.^{6,28} Jednak dokładność tych przyrządów różni się w zależności od modelu.^{16,30}

Refrakcja obwodowa. Oko ma wiele stanów refrakcyjnych otaczających plamkę żółtą w oparciu o promieniowe gradienty mocy optycznej soczewki i rogówki oraz kontur siatkówki. Nazywa się to refrakcją obwodową. Pomiar refrakcji obwodowej stanowi istotny element badań klinicznych, służąc jako wskaźnik stopnia wydłużenia osiowego oka oraz pozwalając ustalić, czy istnieje związek między refrakcją obwodową, postępem krótkowzroczności i skutecznością metod leczenia krótkowzroczności.³⁹ Refrakcję obwodową najczęściej mierzy się, gdy pacjenci patrzą na punkty fiksacyjne umieszczone wzdłuż poziomego pola widzenia, zazwyczaj pod kątem 10°, 20° i 30° w kierunku nosowym i skroniowym od plamki żółtej.⁴⁰ Względna refrakcja obwodowa (RPR) jest obliczana jako różnica między stanem refrakcji obwodowej i centralnej; hiperopieczna RPR odnosi się do względnej nadwzroczności wzdłuż obwodu i jest oznaczana wartością dodatnią (i odwrotnie w przypadku miopiecznej RPR).⁴¹⁻⁴⁷ Do pomiaru refrakcji obwodowej stosowano różne techniki, w tym refrakcję subiektywną, retinoskopię, autorefrakcję i aberrometrię.^{46,47} Podobnie jak w przypadku refrakcji centralnej, refrakcję obwodową najlepiej mierzyć przy użyciu cykloplegii.⁴⁷ Dokładność subiektywnej refrakcji obwodowej jest ograniczona ze względu na gorsze progi rozdzielczości wraz ze wzrostem ekscentryczności.⁴⁸⁻⁵⁰ Ponieważ stosowanie autorefraktometrów do pomiaru refrakcji obwodowej wykracza poza zakres zastosowań przewidziany przez producentów, konieczna jest walidacja tych urządzeń w celu określenia dokładności i powtarzalności pomiarów obwodowych.^{37,51} (1) W szczególności kształt źrenicy jest bardziej eliptyczny niż sferyczny w pomiarach poza osią, co stanowi wyzwanie dla założeń dotyczących frontu fali w algorytmie stosowanym przez autorefraktometr do określenia mocy refrakcyjnej.⁽⁵⁰⁾ Autorefraktometri z otwartym polem wykazały wysoką powtarzalność i dokładność w pomiarach refrakcji obwodowej dla różnych rozmiarów źrenicy w porównaniu z ich odpowiednikami aberrometriami.⁽²⁾

Pomiar RPR może mieć znaczenie kliniczne dla przewidywania efekty leczenia kontroli krótkowzroczności. Wykazano, że dzieci z nadwzrocznością RPR w siatkówce nosowej osiągają lepsze efekty leczenia przy użyciu okularów kontrolujących krótkowzroczność w porównaniu z dziećmi z krótkowzrocznością RPR.³ Asymetria nosowo-skroniowa nie wzrosła tak bardzo w grupie noszącej okulary w porównaniu z grupą leczoną okularami jednoogniskowymi, ale potrzebne są dalsze badania, aby ustalić pełne znaczenie i zastosowanie kliniczne tego odkrycia.⁴

Mapowanie refrakcji w szerokim polu widzenia. Ostatnio wprowadzono na rynek nowe technologie, które umożliwiają szybką i ciągłą charakterystykę refrakcji w centralnej części pola widzenia od 0° do 100°. (7) (-) (8) Konieczne są dalsze badania, ale technika ta może mieć znaczenie w przewidywaniu pacjentów zagrożonych rozwojem krótkowzroczności lub być może w wspieraniu algorytmów służących do indywidualizacji leczenia kontroli krótkowzroczności.

Topografia/tomografia rogówki

Topografia rogówki zapewnia szczegółowe odwzorowanie krzywizny/wysokości przedniej powierzchni rogówki, a ponadto tomografia pozwala zmierzyć grubość rogówki i krzywiznę tylnej powierzchni. Techniki te odgrywają kluczową rolę w dopasowywaniu soczewek kontaktowych oraz w diagnostyce i leczeniu różnych schorzeń oczu. Topografia rogówki odnosi się do pomiaru i wizualizacji przedniej powierzchni rogówki, koncentrując się przede wszystkim na danych dotyczących krzywizny i wysokości. Tomografia obejmuje trójwymiarową rekonstrukcję całej rogówki, w tym zarówno przedniej, jak i tylnej powierzchni oraz grubości rogówki. W obrazowaniu rogówki powszechnie stosuje się metody oparte na odbiciu i projekcji.

Zastosowanie topografii/tomografii. Topografia/tomografia rogówki odgrywa kluczową rolę w ocenie przydatności pacjentów do dopasowania soczewek kontaktowych, w szczególności w leczeniu ortokorekcyjnym. ⁹ Topografia/tomografia bazowa służy jako krytyczny punkt odniesienia w procedurach ortokorekcyjnych, przedstawiając pierwotny kształt i stan rogówki, który zostanie następnie zmieniony w wyniku leczenia. Zmiany kształtu rogówki są mierzone i analizowane w odniesieniu do tego punktu odniesienia i mogą być wykorzystane do ilościowego określenia skuteczności i efektywności leczenia.

Niektóre urządzenia posiadają zintegrowane oprogramowanie do dopasowywania soczewek kontaktowych, które pozwala lekarzom symulować interakcję konkretnych modeli soczewek z rogówką pacjenta. Funkcja ta wspiera indywidualne podejście do doboru soczewek, optymalizując komfort i widzenie. Dodatkowo oprogramowanie może zawierać funkcje projektowania dowolnych kształtów, umożliwiające precyzyjne dostosowanie parametrów soczewek do unikalnej krzywizny i charakterystyki rogówki danej osoby, co skutkuje lepszym dopasowaniem soczewek i lepszymi wynikami widzenia.

Dopasowanie soczewek kontaktowych za pomocą zewnętrznego oprogramowania opartego na informacjach z mapowania rogówki stanowi alternatywne podejście z ulepszoną personalizacją, szczególnie w trudnych przypadkach wymagających asymetrycznych lub specjalistycznych konstrukcji soczewek. Podejście to zapewnia znaczną elastyczność w projektowaniu soczewek, umożliwiając skuteczne leczenie nawet najtrudniejszych przypadków dzięki dostosowanym, indywidualnym rozwiązaniom.

Topografia. Keratioskopia oparta na dysku Placido wykorzystuje okrągły wzór naprzemiennych jasnych i ciemnych pierścieni z centralną aperturą do obserwacji odbicia filmu łzowego, które odpowiada kształtowi rogówki.⁶⁰ Technika dysku Placido nie mierzy bezpośrednio wysokości rogówki, ale traktuje oko jako lustro, którego odbicie jest bardzo wrażliwe na nachylenie rogówki, ale mniej na jej wysokość.⁶¹ Topografy te opierają się na odbiciach, więc problemy takie jak niestabilność filmu łzowego mogą powodować zniekształcone odbicia, prowadząc do luk w danych i niedokładności.⁶² Ponadto nieregularne powierzchnie rogówki mogą powodować błędy związane z odchyleniem promieni podczas korzystania z osi odniesienia do obliczeń.⁶³

Systemy z dyskiem Placido występują w dwóch wariantach: z małym stożkiem i dużym stożkiem. Urządzenia z małym stożkiem wykorzystują krótszą odległość roboczą i rzutują więcej pierścieni na rogówkę w porównaniu z systemami z dużym stożkiem. Cienie nosa i brwi są bardziej znaczące w przypadku większych stożków dysku Placido, co ogranicza analizowany obszar. Niektóre nowoczesne urządzenia łączą dyski Placido z obrazowaniem Scheimpflug i technologią skanującej szczeliny w celu poprawy dokładności.

Alternatywna metoda topografii rogówki wykorzystuje technologie kolorowych diod elektroluminescencyjnych, wprowadzoną po raz pierwszy w 1997 r., ale dopiero niedawno udostępnioną na rynku. Ten rodzaj topografu wykorzystuje 670 wielobarwnych punktów pseudolosowych poprzez odbicie zwierciadlane w celu odtworzenia kształtu rogówki.⁶⁴

W przeciwieństwie do systemów opartych na dysku Placido, metoda ta eliminuje błędy wyrównania (niedopasowanie Placido), poprawiając dokładność w przypadku asymetrycznych lub nieregularnych rogówek.⁶¹⁻⁶⁷

Alternatywną metodą kompleksowej oceny powierzchni oka jest system profilometrii rogówki i twardówki, który rejestruje dane topograficzne rogówki, rąbka i twardówki. System wykorzystuje sekwencyjną konfigurację z dwoma symetrycznymi projektorami telecentrycznymi wyrównanymi z aparatem cyfrowym. Taka konstrukcja umożliwia znaczną redukcję szumów i odchyłeń podczas przetwarzania obrazu dzięki redundantnemu pozyskiwaniu danych, co znacznie poprawia dokładność pomiarów.⁶¹

Tomografia. Istnieje wiele metod uzyskania trójwymiarowej mapy topograficznej rogówki: System skanującej szczeliny łączy trójwymiarową wiązkę skanującej szczeliny z nasadką Placido. Wykorzystuje on triangulację do pomiaru odległości między referencyjną wiązką szczeliny a jej odbiciem uchwyconym przez kamerę, generując szczegółową trójwymiarową mapę topograficzną obejmującą krzywiznę rogówki, przednią i tylną wysokość oraz pachymetrię.⁶⁸

OCT przedniego odcinka oka wykorzystuje interferometrię o niskiej spójności do porównania opóźnionych w czasie odbić światła podczerwonego od struktur przedniego odcinka oka z wartością odniesienia.⁶⁹ OCT w dziedzinie czasu generuje obrazy przekrojowe poprzez regulację położenia lustra odniesienia, natomiast OCT w dziedzinie Fouriera wykorzystuje lustro stacjonarne, a obrazy przekrojowe są tworzone poprzez interferencję między odbiciami próbki i odniesienia.⁷⁰ OCT w dziedzinie Fouriera oferuje szybszy czas akwizycji, zmniejszając artefakty ruchowe i poprawiając rozdzielczość, aby lepiej scharakteryzować struktury normalne i patologiczne.

Zasada Scheimpfluga wykorzystuje aparat fotograficzny ustawiony prostopadłe do wiązki szczelinowej, tworząc przekrój optyczny rogówki i soczewki po zastosowaniu do przedniej części oka. Wiele obrazów może być wykorzystanych do stworzenia trójwymiarowej reprezentacji przedniej komory poprzez skanowanie boczne lub obrót wokół osi wzrokowej.⁷¹ Obrazowanie Scheimpfluga rozwiązuje problem słabej jakości danych z obrzeża rogówki wynikający z jej niepłaskiego kształtu.⁷² Zapewnia dokładną ostrość poprzez wyrównanie soczewki refrakcyjnej i pożądaną płaszczyznę obrazu. Zasada ta pozwala na uzyskanie wyraźnego obrazu obiektów nierównoległych poprzez manipulowanie płaszczyzną obrazu i soczewki.⁷³

Dodatkowe cechy topografii w ocenie zespołu suchego oka. Badania łączą objawy zespołu suchego oka z wadą refrakcji krótkowzroczności, której większa częstość występowania u dzieci krótkowzrocznych ma znaczący wpływ na ich edukację i samopoczucie.^{74,75} Długotrwałe stosowanie ortokorekcji może zmniejszyć integralność gruczołów Meiboma i mieć szkodliwy wpływ na film łzowy u dzieci i młodzieży.^{76,77} Z drugiej strony zauważono, że objawy dyskomfortu i suchości mogą być mniejsze u pacjentów stosujących ortokeratologię nocną niż u tych, którzy noszą soczewki kontaktowe w ciągu dnia.⁷⁸

Niektóre topografy rogówki oferują dodatkowe funkcje oceny filmu łzowego, w tym pomiar jego objętości (wysokość łęcza łzowego) i stabilności (czas rozpadu lub jakość powierzchni) za pomocą nieinwazyjnej wideokeratografii. Istnieją również urządzenia z wbudowaną funkcją meibografii (poprzez prześwietlanie powieki światłem podczerwonym) do obrazowania gruczołów Meiboma.⁷⁹ Tworzenie dostosowanych do indywidualnych potrzeb raportów dotyczących zespołu suchego oka, łączących obrazowanie, skale ocen i kwestionariusze, może wspierać edukację pacjentów i, miejmy nadzieję, przestrzeganie zaleceń dotyczących leczenia.⁸⁰ Konieczne są jednak dalsze prace, aby lepiej zrozumieć powtarzalność i korelację wielu z tych

objektywnych pomiarów jakości filmu łzowego z objawami zgłaszanymi przez pacjentów.

Aberrometria

Aberrometria to pomiar niedoskonałości optycznych w układzie wzrokowym. Pomiary można uzyskać przy użyciu różnych technologii, w tym:

- Aberrometry Hartmann-Shack
- Aberrometry Tscherninga
- Aberrometry z śledzeniem promieni
- Piramidalne wykrywanie fali czołowej

Każda z tych metod wykorzystuje inne techniki i oferuje unikalne zalety w zakresie oceny i korekcji niedoskonałości optycznych w układzie wzrokowym.

Aberrometry Hartmanna-Shacka (lub Shacka-Hartmanna) należą do najczęściej stosowanych urządzeń i były jednymi z pierwszych instrumentów opracowanych do użytku klinicznego.⁸¹⁻⁸⁶ Instrumenty te wprowadzają do oka niewielkie źródło lasera podczerwonego, które po odbiciu od siatkówki tworzy wychodzącą falę czołową, która jest dzielona przez układ soczewek, tworząc punktowe obrazy na czujniku. Odchylenia w położeniu tych obrazów punktowych dają nachylenie frontu fali.

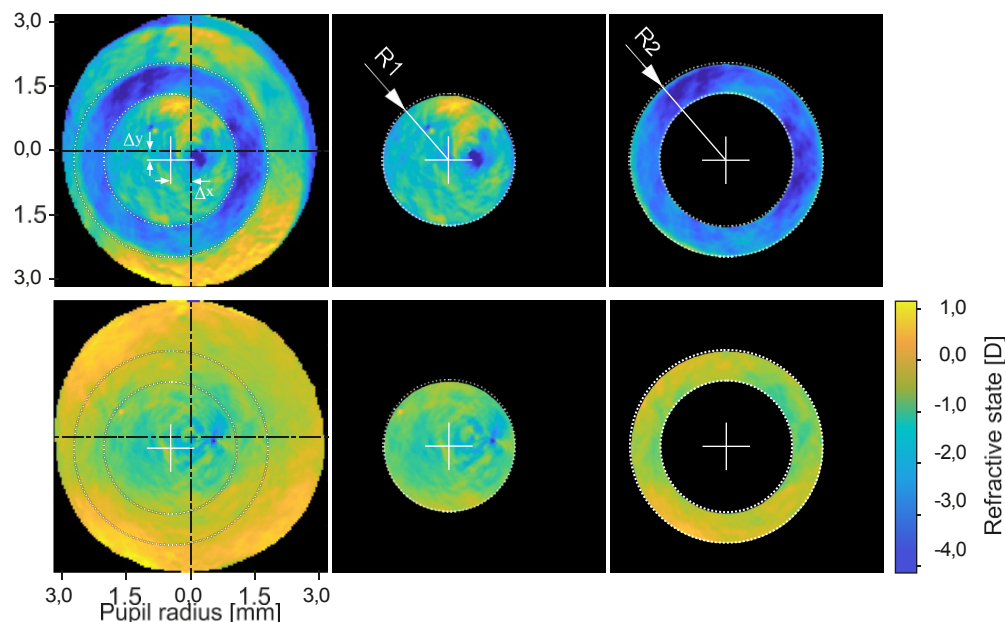
Aberrometry Tscherninga wyświetlają skolimowane źródło lasera przez maskę zawierającą matrycę otworów tworzących wiązkę cienkich promieni. Promienie te tworzą wzór plamkowy na siatkówce, który jest zniekształcony zgodnie z aberracjami oka. Wzór plamkowy jest wyświetlany na czujniku, a położenie wzorów plamkowych względem ich idealnych pozycji pozwala określić nachylenie frontu fali. Ograniczeniem niektórych aberrometrów Tscherninga jest nakładanie się plam w oczach z większymi aberracjami.^{(87) (.) (88)}

Aberrometry wykorzystujące technologię ray tracingu kierują wąską wiązkę lasera do oka równolegle do linii wzroku za pomocą skanera x-y. Skaner przesuwają wiązkę, aby pokryć cały obszar źrenicy. Kierunek, w którym poruszają się wiązki światła podczas wchodzenia i wychodzenia, pozwala na rekonstrukcję błędną fali czołowej.⁸⁷

Technologia piramidalnego aberrometru do wykrywania frontu faliowego opiera się na teście Foucaulta z ostrzem noża i wykorzystuje czterościenny pryzmat piramidalny w płaszczyźnie ogniskowej do podziału frontu faliowego na cztery części.⁸⁹ Pryzmat piramidalny tworzy cztery obrazy źrenicy w płaszczyźnie detektora. Różnice w intensywności między tymi obrazami są spowodowane różnicami w nachyleniu czoła fali opuszczającej oko.^{(90) (-) (92)} Zakres czujnika można rozszerzyć poprzez wprowadzenie dynamicznej modulacji samej piramidy lub skupionej wiązki.

Zastosowanie aberrometrii. Aberrometria na oku pozwala określić ilościowo wpływ strategii kontroli krótkowzroczności na reakcję akomodacyjną.⁹³⁻⁹⁷ Badania wykazały, że jeśli oko nie akomoduje się prawidłowo podczas noszenia soczewek kontrolujących krótkowzroczność, soczewki mogą nie spowalniać wydłużania osiowego w zamierzony sposób.⁹³⁻⁹⁷ Jednak ogólnie rzecz biorąc, obecne konstrukcje optyczne służące kontroli krótkowzroczności nie mają wpływu na akomodację.^{91,(96)} Stwierdzono, że pomiary reakcji akomodacyjnej są podobne w przypadku autorefraktometru i aberrometru, jeśli zadba się o pomiar przy użyciu tej samej pozycji źrenicy i soczewki.⁽⁹⁸⁾ Ponadto, ponieważ aberrometria zapewnia lokalne pomiary stanu refrakcji w całej źrenicy, umożliwia ona ocenę lokalnego rozogniskowania w określonych strefach (rys. 2).⁽⁹⁹⁾

Aberrometria jest stosowana przede wszystkim w badaniach klinicznych do analizy źrenicy poprzez pomiar procentowego udziału ekspozycji na



RYСУNEK 2. Przykład metody analizy soczewki według stref. Stan refrakcji można określić ilościowo jako średnią wartość dioptrii w dostępnych obszarach soczewki w strefie centralnej i pierwszej strefie pierścieniowej soczewki dwuogniskowej (*górny panel*). Obszary równoważnej źrenicy można następnie wykorzystać do analizy tych samych obszarów w soczewkach kontaktowych jednoogniskowych (*dolne panele*). Przedrukowano z odnośnika 9/.

światło rozogniskowane emmetropiczne, nadwzroczne i krótkowzroczne. W oczach noszących soczewki dwuogniskowe rozogniskowanie nadwzroczne zmniejszyło się, podczas gdy rozogniskowanie krótkowzroczne wzrosło, co teoretycznie pomaga spowolnić wydłużanie osiowe.^{96,99} Podobnie, defokus krótkowzroczny w obszarze źrenicy wzrósł od 1,2 do 3,0 razy w przypadku soczewek wielostrefowych w porównaniu z soczewkami jednoogniskowymi, gdy mierzono je na oku.⁽⁹⁷⁾ Aberrometria na oku pozwala również potencjalnie na wizualizację zachowania soczewki kontaktowej na oku, umożliwiając wykrycie problemów, takich jak decentracja soczewki.⁽¹⁰⁰⁾

Reprezentacja aberracji. Mapę aberracji optycznych oka można przedstawić za pomocą oznaczonych kolorami pomiarów nachylenia fali, ale częściej aberracje wyraża się za pomocą modeli matematycznych, takich jak wielomiany Zernike'a.^{101,102} Inną metodą analizy map aberracji jest obliczenie obrazu siatkówkowego obiektu wizualnego, takiego jak punkt świetlny, co daje funkcję rozkładu punktowego (PSF). Funkcję PSF można matematycznie połączyć z obrazem, aby uzyskać szacunkową reprezentację osiągalnego widzenia.¹⁰³ Aby ułatwić porównania, dane dotyczące frontu fali lub PSF można zredukować do różnych pojedynczych wskaźników, które, jak wykazano, dobrze korelują z widzeniem ludzkim.^{104,105} Niektórzy autorzy kwestionują skuteczność wielomianów Zernike'a w dokładnym przedstawianiu całkowitych aberracji falowych oka, szczególnie w przypadkach aberracji wyższego rzędu, takich jak stożek rogówki lub w przypadku oczu noszących soczewki kontaktowe strefowe.^{92,96,106–110}

Alternatywnym podejściem jest strefowa rekonstrukcja frontu falowego, która pozwala uniknąć stosowania wielomianów Zernike'a.^{9,110,111} W przeciwieństwie do metody modalnej, która ma tendencję do wygładzania nierówności spowodowanych gwałtownymi lokalnymi zmianami nachylenia w profilach frontu falowego, strefowa rekonstrukcja frontu falowego może zachować bardziej szczegółowe cechy danych dotyczących nachylenia.¹¹²

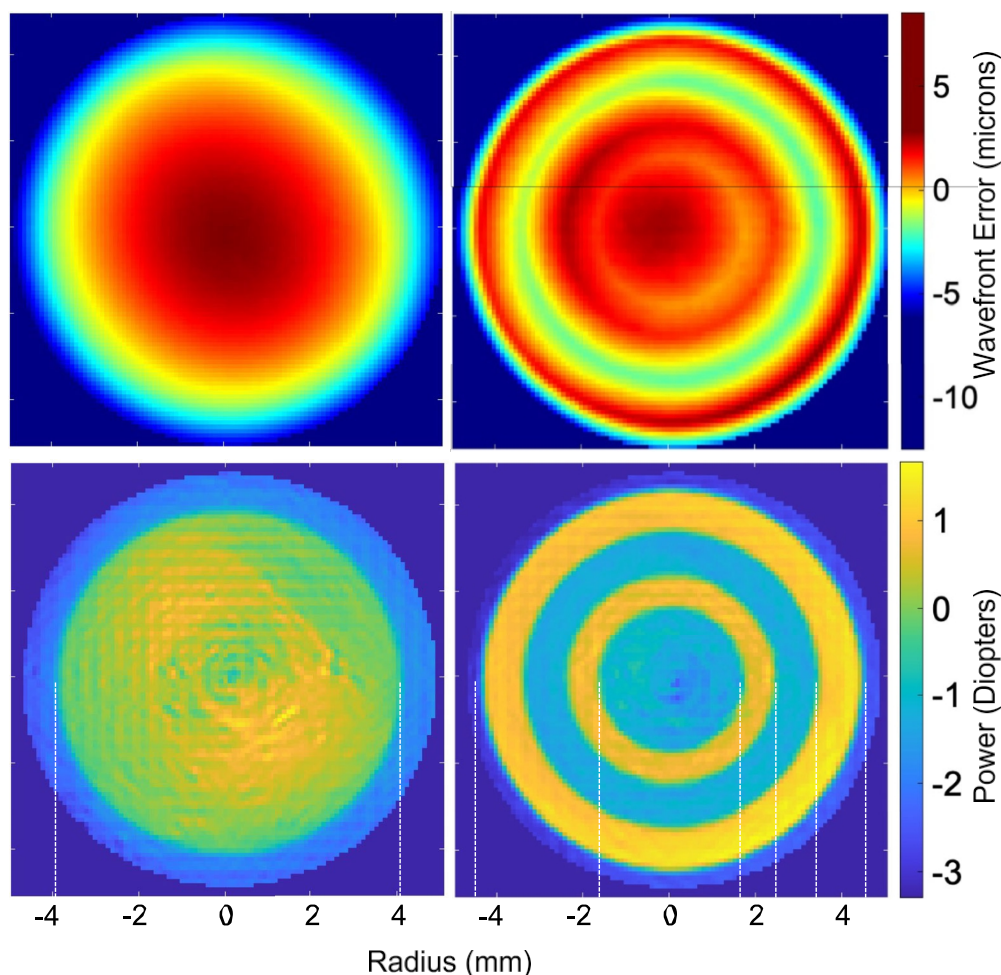
Ponadto, chociaż autorefraktometrii zapewniają lokalną refrakcję w jednym punkcie lub na niewielkim obszarze źrenicy, aberracja

Rometry mogą oceniać stan refrakcji w całej źrenicy (*rys. 3*).⁹⁸ Moc strzałkowa lub zbieżność fali można obliczyć jako lokalne nachylenie w każdym punkcie źrenicy podzielone przez lokalny promień w tym samym punkcie.¹¹³ Lokalną moc krzywizny można określić jako pochodną mocy strzałkowej, co daje korzyści w opisywaniu soczewek strefowych o optyce nie współosiowej.^{108,114} Aberrometria umożliwia również szczegółowy opis soczewek kontaktowych i okularowych do kontroli krótkowzroczności.^{97,98,107,108,111–118}

Pupillometria

Pupillometria odnosi się do pomiaru wymiarów i spontanicznych zmian źrenicy oka. Źrenica reaguje na trzy różne rodzaje bodźców: oświetlenie (powodujące zwężenie – odruch źreniczny), fiksacja bliska (powodująca zwężenie – reakcja źrenicy na bliską odległość) oraz bodźce emocjonalne (powodujące rozszerzenie w ramach psychosensorycznej reakcji źrenicy). Źrenica kontroluje ilość światła wpadającego do oka, a zmiany jej wielkości i kształtu wpływają na optykę oka.^{(119) () (120)} Ogólnie rzecz biorąc, mniejsze źrenice poprawiają jakość obrazu i głębię ostrości, podczas gdy większe źrenice poprawiają wrażliwość wzrokową.^{119,121,122} Zrozumienie wymiarów źrenicy w różnych warunkach oświetlenia i zadaniach ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia oka jako złożonego układu optycznego.

Zastosowanie pupillometrii. Powszechnie wiadomo, że średnica źrenicy wpływa na rodzaj i wielkość aberracji wyższego rzędu występujących w oku.^{123–126} Aberracje te mają wpływ na kilka czynników, w tym na zmierzoną refrakcję oka,¹²⁷ efektywną moc soczewki na oku,^{128–130} optymalną jakość obrazu,^{131–133} oraz związane z tym optymalną korekcję krótkowzroczności.¹¹⁶ Źrenica nie tylko reguluje ilość światła wpadającego do oka, ale także określa, które elementy optyczne wpływają na światło docierające do siatkówki.¹³⁴



RYСУNEK 3. Kolorowe mapy pomiarów *ex vivo* błędu czoła fali (*górne panele*, mikrometry) i mocy (*dolne panele*, dioptrie) soczewki kontaktowej o pojedynczej mocy (*lewe panele*) i podwójnej mocy (*prawe panele*) dla średnicy pomiarowej 10,0 mm przy nominalnych mocach odległościowych odpowiednio – 1,00 i –1,2/ D. Współrzędne mapy podano w milimetrach. Przedrukowano z odniesienia 9/.

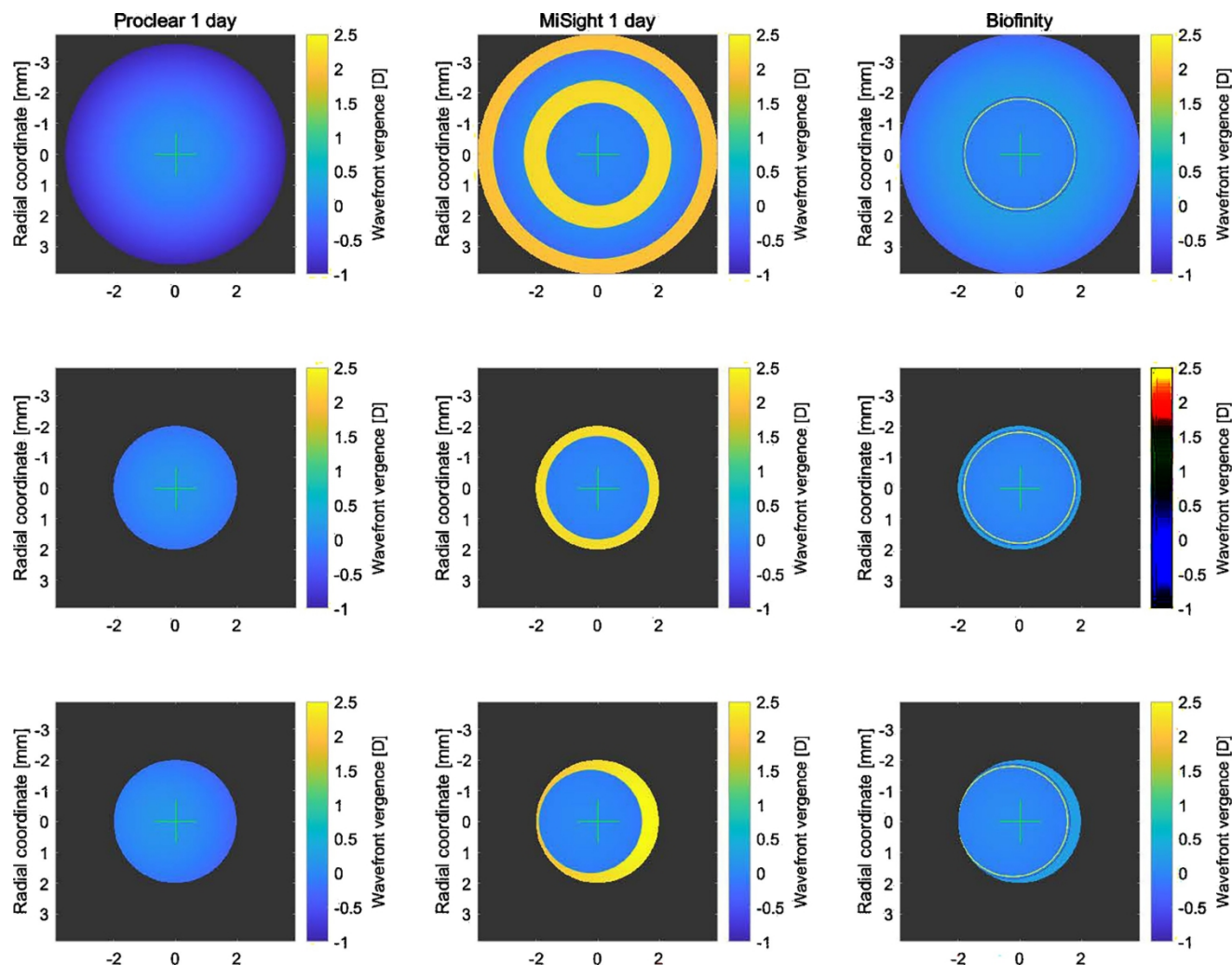
W korekcji przeziopii lub metodach kontroli krótkowzroczności, których celem jest wprowadzenie defokusa krótkowzrocznego, takich jak miękkie soczewki kontaktowe z podwójnym ogniskiem i strefowym wzorem, wielkość źrenicy oddziałuje na centrację soczewki i geometrię strefy optycznej soczewki, wpływając na jakość obrazu i stopień defokusa krótkowzrocznego docierającego do siatkówki.^{(96,97,100,13/} Na przykład wiersz 1 *na rysunku 4* przedstawia przykładowe mapy mocy refrakcyjnej dla apertury 8 mm soczewki jednoogniskowej (kolumna 1) i dwóch przykładowych konstrukcji soczewek strefowych. Gdyby ta mapa mocy była ograniczona aperturą 4 mm, centralna strefa soczewki dominowałaby w optyce odbieranej przez siatkówkę (*rys. 4*, wiersz 2). Jednak ponieważ soczewki kontaktowe zazwyczaj dobrze centrują się na rogówce, mimo że źrenica zazwyczaj nie jest wycentrowana w obrębie rąbka, geometria strefowa soczewki może nie być idealnie dopasowana do źrenicy.¹⁰⁰ To przesunięcie powoduje, że przed źrenicą pojawiają się nieregularne części strefowe soczewki, co wpływa na rozkład stref optycznych i może wpływać na skuteczność kontroli krótkowzroczności (*rys. 4*, wiersz 3).

Znajomość wielkości źrenicy ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia wpływu wszystkich metod leczenia krótkowzroczności, w tym środków farmakologicznych, na wzrok. Może być również wykorzystywana do monitorowania przestrzegania zaleceń.^{136,137} Połączenie wielkości źrenicy i właściwości optycznych urządzenia optycznego, takiego jak soczewki ortokorekcyjne, może mieć wpływ na skuteczność leczenia krótkowzroczności.¹³⁸

W celu lepszego zrozumienia wyników wizualnych i skuteczności leczenia należy mierzyć i brać pod uwagę wymiary źrenicy podczas leczenia krótkowzroczności.

Metody pomiaru. Istnieją różne metody dokładnego pomiaru średnicy źrenicy, chociaż dynamika źrenicy spowodowana reakcjami na światło i akomodację stanowi wyzwanie.^{139,140} Najczęściej średnicę źrenicy mierzy się przy fiksacji wzroku w odległości przy wysokim lub niskim oświetleniu.¹⁴¹ Jednak wielkość źrenicy zależna od wykonywanego zadania może mieć wiele ważnych zalet dla optymalizacji wydajności wzrokowej pacjenta. Na przykład u małych dzieci lub pacjentów z przeziopią wielkość źrenicy może decydować o skuteczności podejścia terapeutycznego, a znajomość wielkości źrenicy pacjenta podczas wykonywania typowych zadań może pomóc w rozwiązywaniu problemów i optymalizacji leczenia.¹⁴²

Tradycyjne metody pomiaru wielkości źrenicy, takie jak linijki lub proste karty subiektywne (np. karty Rosenbauma¹⁴³) z czarnymi okręgami o różnych rozmiarach, które służą do porównania z postrzeganą wielkością źrenicy, mogą być wystarczające w niektórych ogólnych sytuacjach klinicznych. Jednak w wielu placówkach klinicznych i badawczych metody te zostały często zastąpione metodami obiektywnymi. Zautomatyzowana obiektywna pupilometria zapewnia dokładniejsze, bardziej wiarygodne i powtarzalne pomiary.⁽¹⁴⁴⁾ (144) Obiektywne pomiary wielkości źrenicy stały się powszechne.



RYSENEK 4. Mapy rozmycia wyłącznie soczewek Proclear 1 day (lewa kolumna), MiSight 1 day (środkowa kolumna) oraz Biofinity center distance 2,00 D (prawa kolumna) (wszystkie CooperVision) dla apertury centralnej 8 mm (górny rząd), apertury wyśrodkowanej 4 mm (środkowy rząd) oraz apertury 4 mm z soczewką przesuniętą poziomo (dolny rząd) (dzięki uprzejmości Clinical Optics Research Lab, Indiana University).

w niektórych instrumentach wielofunkcyjnych, które dostarczają również innych ważnych danych klinicznych.

Ręczne pupilometri. Nowoczesne ręczne pupilometry zazwyczaj wykorzystują światło podczerwone do uzyskania średnicy średnicy źrenicy w czasie pomiaru (np. 3–4 sekundy), zapewniając większą dokładność i powtarzalność, dzięki czemu są niezawodne w większości praktyk klinicznych.¹⁴⁶ Należy zauważyć, że chociaż średnica źrenicy jest zazwyczaj określana za pomocą jednej liczby, jej kształt jest zazwyczaj eliptyczny, a nie idealnie okrągły, i zmienia się w czasie.^{147,148}

Pupilometri oparte na urządzeniach mobilnych. Wraz z znacznym rozwojem sprzętu i oprogramowania urządzeń mobilnych w ciągu ostatniej dekady, technologia pomiaru źrenicy została zintegrowana z tymi urządzeniami poprzez natywną technologię lub specjalistyczne aplikacje. Przykłady obejmują aplikacje, w których natywna lampa błyskowa aparatu urządzenia jest wykorzystywana do wywołania zwężenia źrenicy i zarejestrowania filmu przedstawiającego źrenicę podczas fazy zwężenia i ponownego rozszerzenia.¹⁴⁹

Ponadto inne technologie nie tylko monitorują odległość widzenia, ale mogą również pozyskiwać informacje o wielkości źrenicy, co dodatkowo pokazuje wszechstronność urządzeń mobilnych w zapewnianiu zaawansowanych ocen opieki okulistycznej. Rozwój ten

uczyniły pupilometrię bardziej dostępną i wygodną, umożliwiając jej szersze zastosowanie zarówno w warunkach klinicznych, jak i codziennych.¹⁵⁰

Urządzenia wielofunkcyjne. Urządzenia zaprojektowane do innych podstawowych celów, takie jak autorefraktometry, aberrometry i topografy rogówki, mogą być również wykorzystywane do pupilometrii, zazwyczaj przy użyciu źródła światła podczerwonego, aby zminimalizować ich wpływ na mierzoną wielkość źrenicy.^{80,151,152} Należy zauważyć, że aberrometry i topografy rogówki zazwyczaj dokonują pomiarów wzdłuż różnych osi. Topografy są zazwyczaj ustawione zgodnie z osią wideokeratopskopa, natomiast aberrometry są ustawione zgodnie z główną linią wzroku.^{153–155} Chociaż różnica ta jest subtelna i prawdopodobnie nie ma znaczącego wpływu na pomiary wielkości źrenicy, może ona wpływać na widoczną lokalizację źrenicy.^{151,153,156,157}

Podobnie urządzenia OCT, które zapewniają wysokiej rozdzielczości przekrojowe obrazy przedniego odcinka oka przy użyciu światła podczerwonego, mogą również dostarczać informacji o średnicy źrenicy. Jednakże powtarzalność i dokładność prototypu binokularowego okazały się nieco gorsze od tych charakteryzujących dedykowany pupilometr podczerwieni, prawdopodobnie z powodu wolniejszego pomiaru pojedynczej klatki B-Scan (a więc bez uśredniania i potencjalnych błędów wyrównania). (1/8)

ramki B-Scan (więc brak uśredniania i potencjalnych błędów wyrównania).¹⁷⁸

STRUKTURALNY

Pomiar wymiarów osiowych (biometria)

Biometria, choć rzadko definiowana w literaturze naukowej, jest ogólnie rozumiana w dwóch kontekstach. Po pierwsze, odnosi się do „pomiarów cech ludzkich”, które są często wykorzystywane do identyfikacji osób — dziedzina ta jest powszechnie znana jako biometria. Po drugie, obejmuje ona „zastosowanie analizy statystycznej do danych biologicznych”, dyscyplinę znaną jako biostatystyka.⁽¹⁹⁾ W okulistyce biometria odnosi się konkretnie do pomiaru cech anatomicznych oka, takich jak długość, krzywizna i moc optyczna. Pomiary te mają kluczowe znaczenie dla różnych zastosowań klinicznych, w tym oceny wzrostu oka, planowania chirurgii refrakcyjnej i dopasowania soczewek kontaktowych. Biometry osiowe są stosowane w dziedzinie krótkowzroczności głównie do oceny długości osiowej, ale są również wykorzystywane do monitorowania zmian grubości naczyniówki.

Zastosowanie biometrii. Długość osiowa jest kluczowym biomarkerem w leczeniu krótkowzroczności, bezpośrednio powiązany z powikłaniami okulistycznymi i utratą wzroku w przypadku krótkowzroczności.¹⁶⁰ Jej pomiar stanowi niezawodną i precyzyjną metodę oceny indywidualnych profili ryzyka oraz monitorowania skuteczności leczenia krótkowzroczności w czasie.^{161–163} Istnieje bezpośrednia korelacja między długością osiową a wadą refrakcji. Jednak zmiany w elementach oka, takich jak soczewka, wpływają na wpływ wydłużenia osiowego na wadę refrakcji.^{164,167} Ogólna wskazówka:

Wzrost osiowy o 0,1 mm odpowiada około 0,2 D wzrostowi wady refrakcji krótkowzrocznej (lub spadkowi wady refrakcji dalekowzrocznej).^{16,166} Biometria jest szczególnie cenna w regionach, gdzie optycy i inni lekarze zajmujący się podstawową opieką okulistyczną mają ograniczone możliwości stosowania cykloplegii. Nie stwierdzono, aby cykloplegia miała wpływ na pomiary długości osiowej.⁽¹⁶⁷⁾ (–) ⁽¹⁶⁸⁾ Korelacja między grubością naczyniówki, długością osiową i wadą refrakcji została dobrze udokumentowana.⁽¹⁶⁹⁾

Metody pomiaru.

Ultrasonografia A-Scan. Ultrasonografia wykorzystuje impulsy ultradźwiękowe o średniej lub wysokiej częstotliwości, a nie światło, do pomiaru odległości na podstawie czasu potrzebnego na odbicie fal ultradźwiękowych od powierzchni.⁽¹⁷⁰⁾ Należy uwzględnić impedancję ultradźwiękową ośrodków pośrednich, ponieważ wpływa ona na prędkość propagacji fal. Dostępne na rynku urządzenia mają dokładność $\approx 0,1$ mm (co odpowiada około 0,2/ D) i charakteryzują się umiarkowanie wysoką powtarzalnością wewnątrzobserwacyjną i niską powtarzalnością międzyobserwacyjną.⁽¹⁷¹⁾ (–) ⁽¹⁷⁴⁾ Ponieważ wymaga to również kontaktu sondy (źródła ultradźwięków) z powierzchnią oka, konieczne jest znieczulenie rogówki, co sprawia, że badanie jest inwazyjne i mniej odpowiednie do oceny pediatrycznej.

Interferometria częściowej spójności. Interferometria częściowej spójności (PCI) została wprowadzona do praktyki klinicznej na początku lat 90.¹⁷ Ponieważ światło jest około 930 000 razy szybsze od dźwięku, czas potrzebny na dotarcie odbicia do czujnika jest zbyt krótki, aby można było go dokładnie zmierzyć. Dlatego w obecnej postaci technika ta rozdziela wiązkę lasera, która przechodzi przez optykę oka, przyjmując różne ścieżki, zanim zostanie ponownie połączona w celu wytworzenia wzoru interferencyjnego (ponieważ różnica ścieżek między wiązkami jest mniejsza niż długość koherencji). Pomiary wymiarów osiowych przy użyciu tego podejścia mają ponad 10-krotnie wyższą rozdzielczość niż pomiary ultrasonograficzne.⁽¹⁷⁶⁾ Pomiar grubości soczewki

Technika ta została opisana tylko w dwóch prototypowych urządzeniach.^{177,178} Komercyjne instrumenty wykorzystujące interferometrię częściowej koherencji zazwyczaj stosują zamiast tego obrazowanie.¹⁷⁹ U dzieci powtarzalność (odchylenie standardowe) tej techniki wynosi od $\sim 0,02$ mm do

0,06 mm w zależności od używanego instrumentu.^{167,179–184}

Optyczna reflektometria o niskiej spójności. Optyczna reflektometria o niskiej spójności (OLCR) została opracowana pod koniec lat 80. XX wieku do pomiaru odbicia w urządzeniach telekomunikacyjnych z rozdzielczością mikrometrową i po raz pierwszy zastosowana do tkanki biologicznej in vivo (oka).^{18/} Różni się od interferometrii częściowej koherencji tym, że wykorzystuje diodę superluminescencyjną o nieco wyższej długości fali (zazwyczaj 820 nm) oraz obrotowy szklany sześcian, który zmienia długość ścieżki wiązki odniesienia,¹⁸⁶ umożliwiając pomiar grubości rogówki i soczewki, a także długości osiowej. Ma podobną rozdzielczość do interferometrii częściowej spójności, a jej powtarzalność u dzieci wynosi od 0,02 do 0,06 mm.^{167,183,184,187,188} Podjęto również próby oceny odbicia naczyniówki, ale są one mniej powtarzalne.^{189,190}

Optyczna tomografia koherencyjna. Technika OCT została opracowana pod koniec lat 90. XX wieku i szybko dostrzeżono jej potencjał w zakresie zwiększenia dokładności pomiaru długości osiowej.¹⁹¹ Jednak dopiero po pojawieniu się źródeł światła o dużej długości koherencji udało się uzyskać głębokość skanowania niezbędną do pomiaru długości osiowej.¹⁹¹ Technika ta jest podobna do interferometrii częściowej koherencji i optycznej reflektometrii niskiej koherencji, z tą różnicą, że wiązka jest skanowana w poprzek oka w celu utworzenia skanu B (który może wykazać, czy wiązka jest dokładnie skierowana na płamkę żółtą), a zmiana ścieżki wiązki odniesienia została przeniesiona z dziedziny czasu (fizycznie poruszające się lustro lub sześcian) do dziedziny spektralnej (gdzie detektor punktowy jest zastąpiony spektrometrem wykorzystującym element dyfrakcyjny do przestrzennego rozdzielania różnych długości fal na obraz liniowy, który jest rejestrowany przez szybką kamerę skanującą) lub źródło światła o zmiennej długości fali (które szybko przesuwają wąską linię o szerokim zakresie długości fal, wykrywane sekwencyjnie przez szybki fotodetektor). Powtarzalność pomiaru długości osiowej u dzieci wynosi od 0,01 do 0,0/ mm.⁽¹⁶⁷⁾ (–) ⁽¹⁸⁰⁾ (–) ⁽¹⁸³⁾ (–) ⁽¹⁹²⁾

Ulepszone obrazowanie głębokości uzyskano poprzez oglądanie odwróconego obrazu po zbliżeniu głowicy instrumentu do oka.¹⁹³ skutecznie przesuwając punkt ogniskowy instrumentu lub stosując dłuższą długość fali.¹⁹⁴ co umożliwiło obrazowanie grubości naczyniówki. Jednak nadal istnieją pewne wyzwania (patrz raport Międzynarodowego Instytutu Krótkowzroczności – The Dynamic Chorioid).⁽¹⁹⁾ Nie odnotowano powtarzalności wyników u dzieci między dwiema sesjami.

Analiza obrazu. Zasada Scheimpfluga jest realizowana za pomocą kamery ustawionej prostopadle do wiązki szczelinowej, co pozwala na obrazowanie przekroju optycznego rogówki i soczewki z kwantyfikacją parametrów za pomocą analizy obrazu. Podobnie jak w przypadku wszystkich technik optycznych i akustycznych, należy skorygować współczynnik załamania światła tkanek pośrednich.⁽¹⁹⁶⁾ Niektóre urządzenia mogą obracać się wokół osi wzrokowej, umożliwiając renderowanie trójwymiarowego obrazu przedniej części oka oraz pomiar grubości rogówki i głębokości przedniej komory; jednak „apertura” wielkości źrenicy uniemożliwia pomiar długości osiowej.⁽¹⁹⁷⁾

Wielofunkcyjne urządzenia do pomiaru refrakcji ()

Wielofunkcyjne urządzenia do pomiaru refrakcji ()

Urządzenia te zrewolucjonizowały praktykę kliniczną poprzez integrację wielu funkcji diagnostycznych w jednym urządzeniu. Instrumenty te łączą pomiar długości osiowej, zazwyczaj za pomocą PCI lub OLCR, jak opisano wcześniej, z oceną

Funkcje takie jak autorefrakcja, pupilometria, keratometria i topografia rogówki usprawniają opiekę nad pacjentem. Integracja tych funkcji pomaga w efektywnym gromadzeniu kompleksowych danych, oszczędzając czas i zmniejszając koszty zarówno dla lekarzy, jak i pacjentów. Oprócz podstawowych funkcji związanych z leczeniem krótkowzroczności, urządzenia te są często wyposażone w funkcje umożliwiające dopasowanie soczewek kontaktowych i ocenę zespołu suchego oka. Są one również obsługiwane przez oprogramowanie, które śledzi zmiany w czasie i zawiera normatywne dane dotyczące długości osiowej, pomagając lekarzom porównać indywidualne dane pacjentów z ustalonymi punktami odniesienia. Generowane raporty są cennymi narzędziami do śledzenia postępów pacjentów i podejmowania świadomych decyzji

dotyczących leczenia krótkowzroczności.

Algorytmy służące do szacowania długości osiowej.

Pomiar długości osiowej powinien być traktowany jako punkt odniesienia w leczeniu krótkowzroczności, ale brak dostępu do biometru nie powinien opóźniać wdrożenia tej metody.¹⁶² W przypadku braku bezpośrednich pomiarów algorytmy służące do szacowania długości osiowej, zatwierdzone przez organizacje zawodowe, w tym College of Optometrists w Wielkiej Brytanii,¹⁹⁸ służą jako tymczasowe narzędzia do oceny ryzyka wraz z refrakcją.

Chociaż modele te pomagają w rozróżnieniu między profilami ocznymi normalnymi i wysokiego ryzyka, zmienność biologiczna ogranicza ich dokładność.¹⁹⁹ Oszacowanie długości osiowej powinno być traktowane jako podejście przejściowe, które ma pomóc w podejmowaniu decyzji klinicznych i zachęcić do stosowania bezpośredniej biometrii w przyszłości.

Pomimo oczywistych korzyści, pomiar długości osiowej pozostaje niedostatecznie wykorzystywany w podstawowej opiece zdrowotnej, plasując się za refrakcją, wiekiem i historią rodzinną w procesie podejmowania decyzji klinicznych dotyczących kontroli krótkowzroczności.²⁰⁰ Ograniczenia finansowe wydają się stanowić znaczną przeszkodę we wdrażaniu biometrii, a koszt wprowadzenia nowej technologii jest często wymieniany jako bariera.^{201–204} Lekarze wyrazili również obawy dotyczące interpretacji danych dotyczących długości osiowej i jej roli w odróżnianiu normalnego wzrostu oka od wzrostu krótkowzrocznego.²⁰³ Rozwiązanie tych problemów poprzez ulepszone modele szacowania i opłacalne rozwiązania może ułatwić szersze wdrożenie biometrii w leczeniu krótkowzroczności.

Wczesne modele szacowania długości osiowej opierały się na liniowej zależności między wadą refrakcji a długością osiową.^{205–208} Uzyskując szacunki wyłącznie na podstawie sferycznej równoważnej wady refrakcji lub w połączeniu z krzywizną rogówki.^{209–(213)} Jednak modele te wykazywały słabą skuteczność w warunkach klinicznych, charakteryzując się dużymi limitami zgodności (od 0,70 mm d o – 1,6 mm),^{(199) (213) (214)} oraz 30-procentowym wskaźnikiem błędnej klasyfikacji ryzyka upośledzenia wzroku.⁽²¹⁴⁾

Ich ograniczenia wynikają z nieuwzględnienia kluczowych czynników, takich jak wiek i płeć. Wiek ma znaczący wpływ na wzrost oka, które w ciągu pierwszych dwóch lat ulega szybkiemu wydłużeniu, osiągając rozmiar dorosłego w wieku pięciu lat, a następnie wydłuża się nieznacznie.⁽²¹⁵⁾ Oczy krótkowzroczne wykazują nieprawidłowe wzorce wzrostu, które mogą utrzymywać się w wieku dorosłym, zwłaszcza w przypadku oczu z wysoką krótkowzrocznością, u których istnieje ryzyko powikłań.^{216–222} Płeć biologiczna również wpływa na długość osiową, przy czym mężczyźni mają zazwyczaj dłuższe oczy niż kobiety.^{223–226} Chociaż modele skorygowane o wiek wykazują większą dokładność, ich granice zgodności ($\pm 0,23$ mm) są nadal zbyt szerokie, aby można je było wykorzystać do monitorowania leczenia.²¹³

Techniki uczenia maszynowego, w tym wielokrotna regresja liniowa, regresja symboliczna, wzmacnianie gradientowe i wielowarstwowe perceptrony, udoskonaliły modele szacunkowe poprzez uwzględnienie nieliniowych zależności między wiekiem, płcią, refrakcją i rogówką.^{199,210,227–229} Spośród nich wielokrotna regresja liniowa wykazała się najlepszą skutecznością w różnych populacjach, dokładnie identyfikując oczy z wysokim ryzykiem krótkowzroczności i zbliżając się do fizjologicznych granic dokładności szacowania

bez uwzględniania mocy soczewki, wykazując skuteczność kompleksowego podejścia.¹⁹⁹ Postępy te podkreślają potencjał ulepszonych badań przesiewowych, ale wzmacniają potrzebę bezpośredniej biometrii w długoterminowym leczeniu.

Obrazowanie tylnego odcinka oka

Zastosowanie obrazowania tylnego odcinka oka.

Obrazowanie tylnego odcinka oka odgrywa ważną rolę w monitorowaniu bezpieczeństwa terapii kontroli krótkowzroczności, które są zazwyczaj stosowane u dzieci i młodych dorosłych, a także w monitorowaniu osób starszych w celu wykrywania i monitorowania patologii spowodowanych krótkowzrocznością.^{230,231} Sugeruje się również, że krótkotrwałe zmiany grubości naczyniówki obrazowane za pomocą OCT mogą pomóc w przewidywaniu skuteczności terapii krótkowzroczności u poszczególnych osób, rozwoju refrakcji u młodych dorosłych oraz makulopatii związanej z krótkowzrocznością.^{232–237}

Aparaty do fotografowania dna oka.

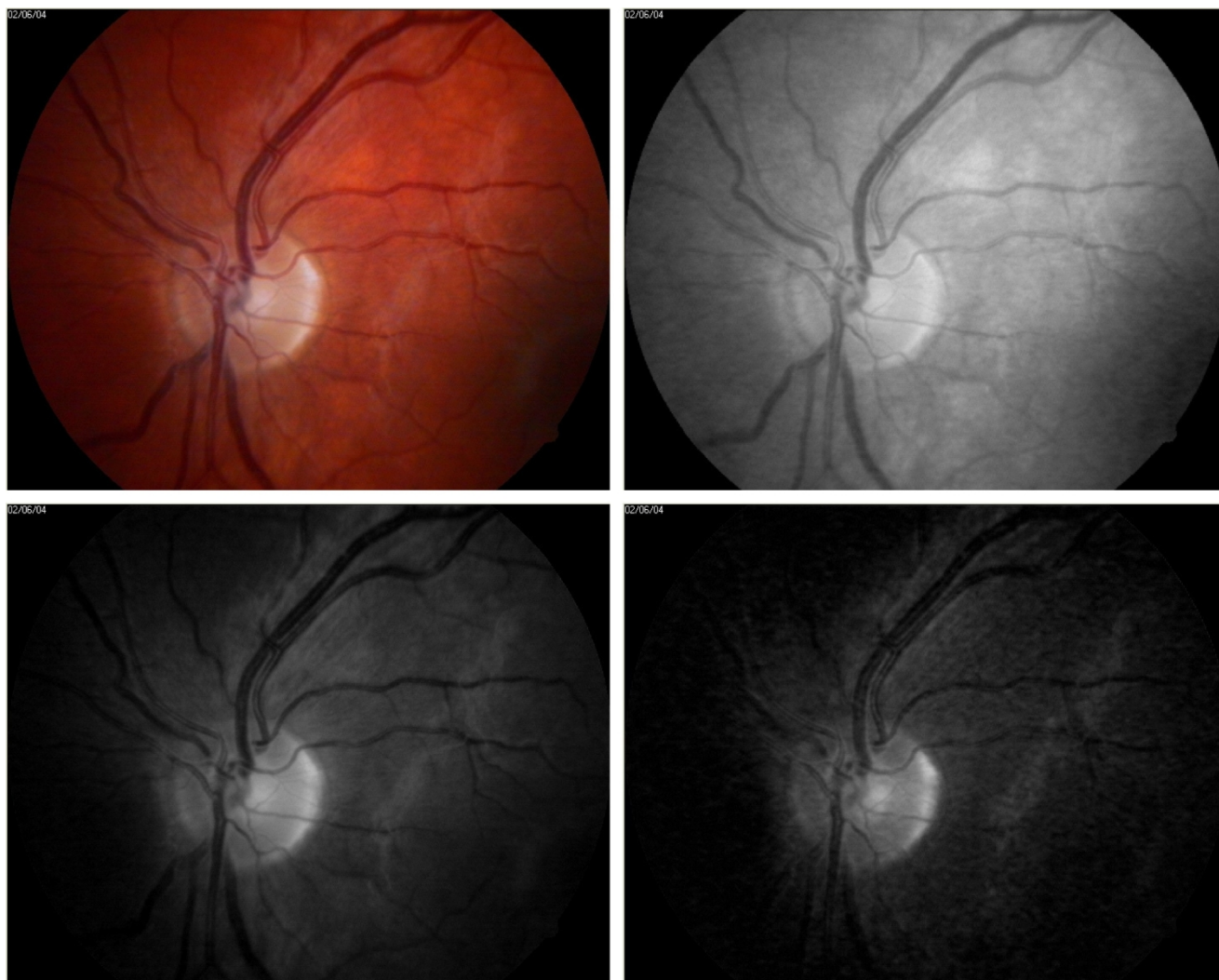
Aparaty do fotografowania siatkówki wykorzystują obrazowanie cyfrowe.

chipu do natychmiastowego przechwytywania i wyświetlania obrazu. Wiele urządzeń posiada funkcję autofokusa, podczas gdy inne umożliwiają dokładniejsze określenie początkowej odległości roboczej za pomocą prezentacji podzielonej źrenicy. Do ułatwienia pozycjonowania można również użyć drugiej przedniej kamery skupionej na oku. Następnie umieszcza się soczewkę o dużej mocy dodatniej, aby zneutralizować moc optyczną soczewki krystalicznej i rogówki, umożliwiając odwrócony widok dna oka z lotu ptaka.²³⁸ Światło wrażliwe na bliską podczerwień jest zazwyczaj używane do ułatwienia pozycjonowania w taki sposób, aby siatkówka była ostra, a kamera wyśrodkowana na interesujących obszarach.²³⁹ Ta funkcja minimalizuje wpływ na wielkość źrenicy przed zsynchronizowanym błyskiem białego światła, który rejestruje obraz w celu optymalizacji obrazowania siatkówki.²³⁸

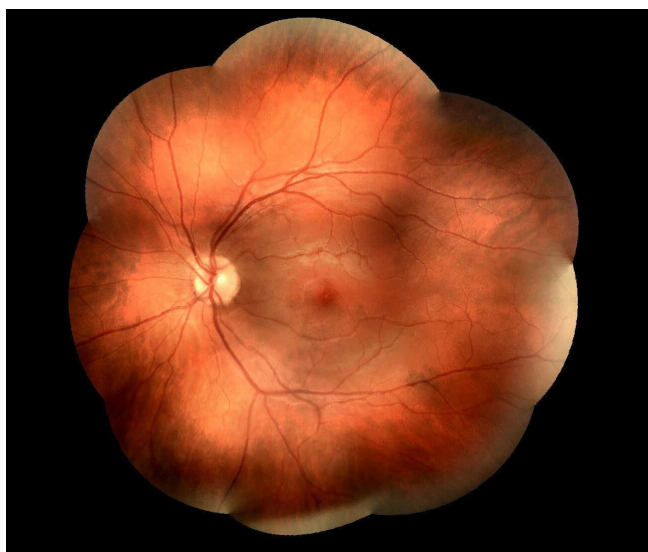
Jakość zarejestrowanych obrazów zależy zarówno od optyki aparatu, jak i optyki pacjenta, którego obraz jest rejestrowany. Czynniki takie jak zaćma i anomalie rogówki mogą wpływać na jakość obrazu, podobnie jak małe źrenice, chyba że do ich rozszerzenia zostanie użyty środek rozszerzający źrenice. Rozmiar obrazu różni się w zależności od wady refrakcji pacjenta i użytego aparatu, a różnica powiększenia wynosi około 1% do 30%^{240,(241)} co ma wpływ na dokładność pomiarów suwmiarką. Aby zapewnić wiarygodność, do stałego monitorowania wielkości zmiany w czasie należy używać tego samego aparatu. Rejestrowanie intensywności błysku pomaga usprawnić obrazowanie kontrolne i zapewnia bardziej spójne wyniki. Wyodrębnianie płaszczyzn kolorów może pomóc w podkreśleniu ważnych cech, takich jak wyświetlanie tylko zielonych pikseli w celu uwydatnienia naczyń krwionośnych i krwotoków (rys. 7).

Obrazy złożone, gdzie można zrobić kilka zdjęć (zwykle około siedmiu) z pacjentem patrzącym w ustalone miejsca, a potem połączyć je za pomocą oprogramowania, żeby uzyskać większe pole widzenia do 8/° (rys. 6).²⁴² Niektóre programy są w stanie wyświetlać pary obrazów stereo w odpowiednich okularach na podstawie obrazów dna oka zarejestrowanych z różnych miejsc lub pod różnymi kątami.²⁴³ Funkcje nakładania lub porównywania umożliwiają lepsze monitorowanie zmian między wizytami. Sztuczna inteligencja oparta na głębokim uczeniu się została zastosowana do obrazów dna oka dzieci w celu przewidywania rozwoju wysokiej krótkowzroczności²⁴⁴ i oceny stopnia zmian.²⁴⁵

Skanujące oftalmoskopy laserowe. Zamiast używać matrycy pikselowej do obrazowania dna oka, skanujące oftalmoskopy laserowe skanują laser w układzie rastrowym, wykorzystując odbicie światła w poszczególnych kolejnych punktach dna oka do utworzenia obrazu.²⁴⁶ Takie podejście pozwala na użycie jaśniejszego światła niż w przypadku fotografii konwencjonalnej, co zapewnia wyraźniejszy obraz. Wykorzystanie optyki adaptacyjnej



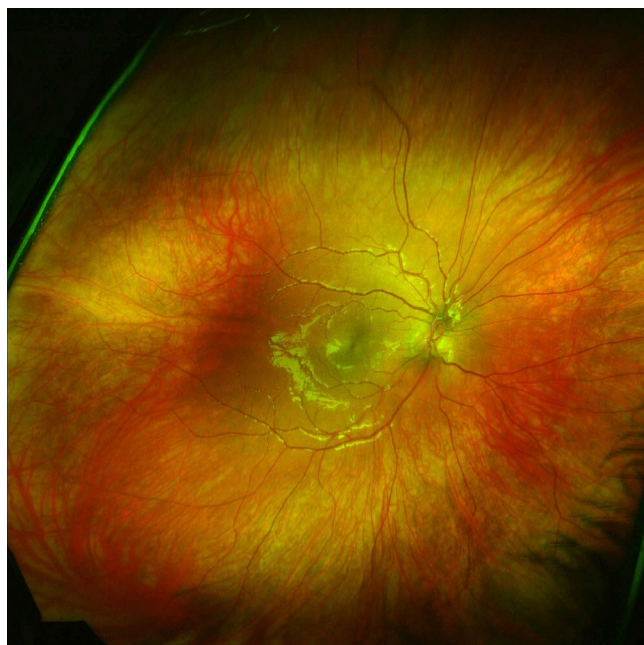
RYSUNEK 1. Obraz dna oka (*u góry po lewej*) podzielony na składowe czerwone (*u góry po prawej*), zielone (*u dołu po lewej*) i niebieskie (*u dołu po prawej*) (dzięki uprzejmości Jamesa Wolffsohna).



RYCINA 6. Mozaika dna oka złożona z dziewięciu standardowych obrazów 4/°, „zszytych” za pomocą oprogramowania do rejestracji (dzięki uprzejmości Jamesa Wolffsohna).

koryguje aberracje wyższego rzędu w celu poprawy rozdzielczości bocznej i osiowej, umożliwiając szczegółową wizualizację struktur siatkówki, takich jak fotoreceptory, włókna nerwowe i przepływ krwi w siatkówce, a także osiowe przekroje tkanki siatkówki.²⁴⁷

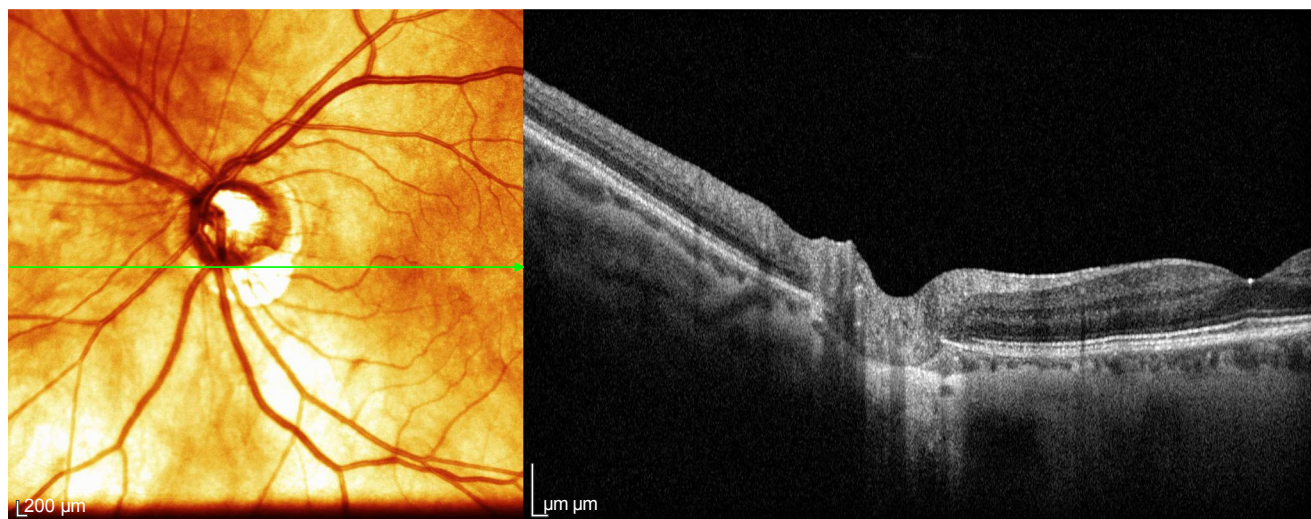
Oftalmoskop konfokalny z szerokim ekranem zapewnia widok siatkówki w zakresie do 200°, obejmujący około 82% powierzchni.²⁴⁸ Osiąga sięto za pomocą dwóch elipsoidalnych zwierciadeł o współosiowych ogniskach (jedno w płaszczyźnie źrenicy, aby zminimalizować aberracje czoła fali i ułatwić uzyskanie szerokiego pola widzenia). System skupia światło przez aperturę konfokalną i różne filtry na czujniku światła, aby uchwycić obrazy obrzeża siatkówki bez konieczności stosowania silnego oświetlenia, w większości przypadków bez rozszerzania źrenicy.⁽²⁴⁸⁾ Obraz z kolimowanego lasera zielonego o niskiej mocy (/32 nm) zawiera informacje od siatkówki czuciowej po warstwy barwnikowego nabłonka siatkówki. Obraz z kanału czerwonego (laser 633 nm) zawiera informacje z głębszych struktur siatkówki, od barwnikowego nabłonka do naczyńki. Angiografię fluoresceinową można wykonać za pomocą lasera niebieskiego (488 nm), a angiografię indocyjaninową za pomocą lasera podczerwonego (80/ nm). Dzięki połączeniu obrazów czerwonych i zielonych różnych warstw siatkówki,



RYCINA 7. Obraz dna oka wykonany za pomocą szerokopółowego skanującego oftalmoskopu laserowego (dzięki uprzejmości Jamesa Wolffsohna).

Obrazy dna oka wyglądają zupełnie inaczej niż te uzyskiwane za pomocą standardowych aparatów do fotografowania dna oka, które rejestrują światło czerwone, zielone i niebieskie z powierzchni siatkówki (rys. 7).

Optyczna tomografia koherencyjna. OCT wykorzystuje interferometrię o niskiej koherencji do generowania obrazów siatkówki i naczyniówki o wysokiej rozdzielczości w przekroju poprzecznym (skan B). Rejestruje dwuwymiarowe przekroje, wyświetlając poszczególne warstwy siatkówki. Analiza tych warstw pomaga w wykrywaniu zmian patologicznych i monitorowaniu chorób oczu. Jej nieinwazyjny charakter sprawia, że idealnie nadaje się do powtarzanych badań klinicznych. Ulepszone obrazowanie głębi i OCT ze źródłem przemiatanym poprawiają wizualizację głębszych struktur, takich jak naczyniówka, ujawniając grubość i wzorce naczyniowe (rys. 8). Pomiar



RYSUNEK 8. Obraz OCT (dzięki uprzejmości Deborah Jones).

Pomiar grubości naczyniówki pozwala uzyskać informacje na temat zmian strukturalnych związanych z krótkowzrocznością, w tym zmian związanych z postępowaniem krótkowzroczności. OCT może być również przydatne w diagnozowaniu, ocenie i monitorowaniu zmian siatkówki związanych z krótkowzrocznością, takich jak makulopatia krótkowzroczna i staphyloma.^{(249) (-) (2/1)} Badania wykazały, że krótkowzroczność wiąże się z cieńszą naczyniówką, a cieńsza naczyniówka jest powiązana z szybszym wydłużeniem osiowym, co czyni ją potencjalnym biomarkerem postępu krótkowzroczności.^{2/2-2/4} Ze względu na naturalny rozkład grubości w obrębie naczyniówki, pomiary mogą wykazywać różnice między wizytami i między różnymi instrumentami.^{2/} Badania wykazały ograniczenia w zakresie wiarygodności i powtarzalności pomiarów grubości naczyniówki, sugerując, że zmiany mniejsze niż 10 µm mogą nie odzwierciedlać wywołano prawdziwą zmianę fizjologiczną.^{189,2/6}

Intervencje takie jak ortokorekcja i atropina są związane z pogrubieniem naczyniówki, co sugeruje istnienie mechanizmu ochronnego przed postępowaniem krótkowzroczności.^{2/7,2/8} Chociaż grubość naczyniówki może być cennym wskaźnikiem do monitorowania krótkowzroczności, jest ona wykorzystywana głównie w badaniach naukowych, a jej bezpośrednia rola w klinicznym leczeniu pacjentów nie została jeszcze ustalona.

Ogólne zastosowanie instrumentów do leczenia krótkowzroczności

Wykorzystanie instrumentów różni się w zależności od etapu naturalnego przebiegu krótkowzroczności, od oceny pacjentów z grupy ryzyka, którzy nie są krótkowzroczni, poprzez początkowy etap i postępowanie krótkowzroczności, aż po jej aktywne leczenie za pomocą środków optycznych, farmakologicznych lub kombinacji tych metod. Podejście to obejmuje całe życie danej osoby, począwszy od dzieciństwa lub okresu dojrzewania, poprzez fazę aktywnego postępu, aż po stabilizację i długoterminowe leczenie krótkowzroczności w wieku dorosłym i starszym.

Przed krótkowzrocznością. Przed wystąpieniem krótkowzroczności ocena ryzyka wystąpienia krótkowzroczności u dziecka obejmuje analizę różnych czynników, w tym historii rodzinnej, czynności wykonywanych z bliska oraz przebywania na świeżym powietrzu. Cenne informacje dostarczają parametry ilościowe, takie jak długość osiowa i wada refrakcji. Refrakcja

Wada wzroku w wieku 6 lat (klasa 1) została wskazana jako silny czynnik prognostyczny przyszłej krótkowzroczności.^{2,9} Naukowcy odkryli, że tylko 10% uczniów trzeciej klasy z wadą refrakcji wynoszącą co najmniej 1,00 D rozwinęło krótkowzroczność, w porównaniu z 7% uczniów z emmetropią.²⁶⁰ Ponadto dzieci z wysokim ryzykiem wystąpienia krótkowzroczności (wady refrakcji poniżej 0,7 D w wieku sześciu lat) miały większe prawdopodobieństwo wystąpienia krótkowzroczności w wieku 13 lat. Wykorzystanie takich czynników prognostycznych zależy od dostępności danych dotyczących wad refrakcji po zastosowaniu cykloplegii, co nie zawsze jest możliwe. Obecnie do oceny ryzyka wystąpienia krótkowzroczności preferowane są nieinwazyjne metody ilościowe. Opracowano nowe algorytmy i nomogramy oparte na biometrii optycznej w celu oceny prawdopodobieństwa wystąpienia krótkowzroczności w wieku dorosłym poprzez analizę pomiarów długości osiowej wykonanych w dzieciństwie, okresie dojrzewania i wczesnej dorosłości.⁽¹⁶³⁾ Normatywne dane dotyczące długości osiowej zostały włączone do wielofunkcyjnych instrumentów, aby pomóc w przewidywaniu i monitorowaniu postępu krótkowzroczności. Istnieje również wiele internetowych narzędzi do oceny ryzyka krótkowzroczności, które pomagają lekarzom w leczeniu pacjentów.

Wykorzystanie refrakcji obwodowej i szerokokątowej jako czynników prognostycznych postępu krótkowzroczności pozostaje kontrowersyjne. Chociaż w jednym z badań stwierdzono istotne zmiany w względnej refrakcji obwodowej przed wystąpieniem krótkowzroczności i do momentu jej ustabilizowania, w innych badaniach nie stwierdzono związku przyczynowego między wzorcami refrakcji obwodowej a rocznym postępem krótkowzroczności.^{261,262} Nowe technologie, takie jak refrakcja falowa szerokokątna i wielospektralna topografia refrakcji, wykazały potencjalny związek między wzorcami refrakcji siatkówki w szerokim polu (od 0° do 100°) a tendencjami krótkowzroczności, ale dowody pozostają ograniczone.^{263–266}

Początek i postęp krótkowzroczności. Częste kompleksowe badania funkcji wzroku (ostrość widzenia na odległość) i refrakcji (przy rozluźnionej akomodacji) są niezbędne do wczesnego rozpoznania krótkowzroczności. Badania wykazały, że średnio krótkowzroczność rozpoznaje się u pacjenta, gdy wartość ekwiwalentu sferycznego wynosi –1,00 D lub więcej, co sugeruje, że krótkowzroczność postępowała, a wzrok nie był korygowany przez pewien czas.^{200,266} W przypadku pacjentów zagrożonych krótkowzrocznością częste wizyty, co najmniej co sześć miesięcy, mogą pomóc w rozpoczęciu leczenia kontrolującego krótkowzroczność w najwcześniejszym stadium jej rozwoju.^{162,164} Wczesne wykrycie krótkowzroczności jest również możliwe poprzez pomiar zmian długości osiowej, ponieważ wiadomo, że szczytowe tempo wydłużania osiowego występuje w ciągu dwóch do trzech lat przed wystąpieniem refrakcji krótkowzrocznej.^{163,267} Zmiany biometryczne (wzrost osiowy) mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia tempa wzrostu oka, natomiast widzenie obuoczne, akomodacja i stosunek AC/A mogą również identyfikować zmiany funkcjonalne, które najwyraźniej towarzyszą procesowi krótkowzroczności.²⁶⁷

W badaniu przeprowadzonym na Tajwanie zbadano zmiany w krzywizny rogówki, głębokości przedniej komory oka i grubości soczewki w oczach krótkowzrocznych, emmetropicznych i dalekowzrocznych. Badanie wykazało znaczące różnice we wzroście oka między tymi trzema grupami refrakcyjnymi. W wieku od 8 do 14 lat zaobserwowano znaczącą zmianę grubości soczewki, zbiegającą się z okresem szybkiego wzrostu oka. W tym czasie oczy krótkowzroczne wykazywały stałą tendencję do posiadania cieńszych soczewek krystalicznych w porównaniu z oczami emmetropicznymi i dalekowzrocznymi.⁽²⁶⁸⁾ W innym badaniu zbadano zmiany w soczewce krystalicznej przed i po wystąpieniu krótkowzroczności i odkryto, że chociaż długość osiowa i wada refrakcji uległy znacznej zmianie w ciągu roku przed wystąpieniem krótkowzroczności, grubość soczewki

Wraz z wiekiem zmiany związane z wiekiem pozostawały w dużej mierze stabilne, obserwowane przed wystąpieniem krótkowzroczności i po jej wystąpieniu.²⁶⁹ Podobnie jak w przypadku stosowania nomogramów do oszacowania ryzyka wystąpienia krótkowzroczności przed jej wystąpieniem, te same nomogramy pozostają przydatne dla osób, które już są krótkowzroczne, i pomagają ocenić ryzyko dalszego postępu w kierunku wysokiej krótkowzroczności w wieku dorosłym.²⁷⁰

Leczenie kontroli krótkowzroczności. Obecnie kontrola krótkowzroczności skupia się przede wszystkim na monitorowaniu wzrostu oka poprzez pomiar zmian refrakcji i długości osiowej za pomocą biometru optycznego. Kompleksowa ocena pacjentów z krótkowzrocznością powinna również obejmować ocenę widzenia obuocznego, akomodacji oraz zmian krzywizny rogówki/topografii. W przypadkach szybkiego postępu krótkowzroczności lub gdy wysoka lub bardzo wysoka krótkowzroczność występuje w dzieciństwie i okresie dojrzewania, funkcje wzrokowe mogą ulec pogorszeniu, a zmiany w siatkówce często można wykryć za pomocą fotografii dna oka i obrazowania OCT.

Wykazano, że różne metody leczenia krótkowzroczności powodują zwiększenie grubości naczyniówki, co może mieć wpływ na ocenę ich rzeczywistej skuteczności. Ponieważ wzrost grubości naczyniówki może być przejściowy i po zaprzestaniu leczenia może powrócić do poziomu wyjściowego, należy wziąć ten efekt pod uwagę przy ocenie kontroli wydłużenia osiowego i potencjalnych efektów odbicia.^{271–274}

Zarówno w praktyce klinicznej, jak i w badaniach naukowych ocena potencjalnie krótkowzrocznych lub nowo powstałych krótkowzrocznych oczu często obejmuje standardowe kompleksowe badanie okulistyczne. Naukowcy wykorzystują różne dodatkowe technologie, aby zbadać wpływ metod leczenia krótkowzroczności na strukturę oka, właściwości optyczne i stan funkcjonalny oka krótkowzrocznego. Chociaż zmiany refrakcji i długość osiowa są głównymi wynikami badań dotyczących kontroli krótkowzroczności, badano również inne parametry, takie jak grubość rogówki, głębokość przedniej komory oka, grubość soczewki krystalicznej, zmiany siatkówki, grubość naczyniówki i aktywność elektretinalna, aby uzyskać bardziej szczegółowe informacje na temat wpływu tych metod leczenia.^{(232) (275) (276) (277) (278)}

Obserwacja dorosłych i osób starszych z krótkowzrocznością. Biorąc pod uwagę ryzyko związane z wysoką krótkowzrocznością²⁷⁹, kluczowe znaczenie ma częsta obserwacja, szczególnie od 0 roku życia w przypadku pacjentów z bardzo wysoką krótkowzrocznością (≤ -10 D lub ≥ 28 mm) oraz po 60 roku życia w przypadku wysokiej krótkowzroczności ($-6,00$ do $-10,00$ D lub $26-28$ mm).¹⁶³ Oprócz standardowych technik klinicznych, takich jak biomikroskopia dna oka i binokularowa oftalmoskopia pośrednia do oceny przedniego odcinka i dna oka, do identyfikacji i monitorowania makulopatii krótkowzrocznej i innych zmian siatkówki preferowane jest stosowanie fotografii dna oka i OCT.^{2,0,(280)} Zmiany obwodowe, które mogą zwiększać ryzyko odwarstwienia siatkówki, można łatwiej zidentyfikować za pomocą fotografii dna oka z szerokim polem widzenia. Badanie przeprowadzone w Chinach wykazało, że zastosowanie aparatu do obrazowania dna oka z ultraszerokim polem widzenia było lepsze niż standardowe badanie z użyciem środków rozszerzających źrenicę w wykrywaniu zmian w górnych i dolnych kwadrantach.²⁸¹ Osoby z krótkowzrocznością, zwłaszcza z wysoką krótkowzrocznością, są narażone na zwiększone ryzyko rozwoju jaskry.^{282–287} W związku z tym należy wykonać tonometrię. Istnieją różne metody pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego, jednak tonometria Goldmanna nadal jest uważana za złoty standard.²⁸⁶ Bezkontaktowe metody tonometrii mają tendencję do zawyżania wartości ciśnienia wewnątrzgałkowego w porównaniu z tonometrią aplanacyjną Goldmanna.^{287,288} Oprócz dokładnego monitorowania ciśnienia wewnątrzgałkowego należy dokładnie badać zmiany w warstwie komórek zwojowych siatkówki i strukturze nerwu wzrokowego oraz monitorować je za pomocą OCT tylnego odcinka gałki ocznej i oceny pola widzenia.

z wykorzystaniem technik perymetrycznych w celu oceny potencjalnych zmian funkcjonalnych.²⁸⁹

Oprogramowanie wspomagające komunikację i podejmowanie decyzji klinicznych

Pomimo rosnącej świadomości i zaangażowania w kontrolę krótkowzroczności, wielu specjalistów zajmujących się ochroną wzroku (ECP) nadal priorytetowo traktuje korekcję wzroku wyłącznie za pomocą okularów jednoogniskowych lub soczewek kontaktowych. Chociaż postrzegana skuteczność metod kontroli krótkowzroczności jest wysoka, ich stosowanie pozostaje niejednolite.²⁰⁰ Ta niechęć do pełnego zaangażowania się w leczenie krótkowzroczności może wynikać z szeregu czynników klinicznych, komunikacyjnych i komercyjnych. Dodatkowy czas poświęcony na wizyty i wymóg ciągłości opieki, aby jak najlepiej zaspokoić potrzeby poszczególnych pacjentów, budzą poważne obawy. Pomimo wysokiego poziomu wyszkolenia, specjaliści ds. opieki okulistycznej zgłaszają również brak pewności w zakresie podejmowania spersonalizowanych decyzji i przekazywania istotnych informacji dotyczących kontroli krótkowzroczności.^{201,203} Narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji klinicznych i komunikację, które łagodzą lub eliminują pozostałe bariery w stosowaniu metod kontroli krótkowzroczności przez specjalistów ds. opieki okulistycznej oraz ich akceptację przez pacjentów i rodziców, będą miały kluczowe znaczenie we wspieraniu specjalistów ds. opieki okulistycznej w leczeniu pacjentów zgodnie z powszechnie przyjętymi standardami opieki.

Wyzwania komunikacyjne. Podnoszenie świadomości rodziców na temat przyczyn krótkowzroczności, zagrożeń z nią związanych oraz korzyści płynących z leczenia ma kluczowe znaczenie, ponieważ rodzice odgrywają kluczową rolę w podejmowaniu decyzji dotyczących opieki zdrowotnej i stylu życia swoich dzieci.^{290,291} Skuteczne leczenie zależy od tego, czy rodzice uznają znaczenie interwencji dla zdrowia oczu swoich dzieci. Wielu rodziców postrzega krótkowzroczność jako niewielką niedogodność, a nie poważny problem zdrowotny (²⁹²), często nie zdając sobie sprawy z ryzyka chorób oczu i utraty wzroku. Niezwykle ważne jest edukowanie rodziców na temat potencjalnych konsekwencji postępującej krótkowzroczności oraz praktycznych aspektów, kosztów, ryzyka i korzyści związanych z różnymi opcjami leczenia.⁽²⁹²⁾ Ważne jest również ustalenie realistycznych oczekiwań, ponieważ korzyści płynące z leczenia krótkowzroczności mogą stać się widoczne dopiero po latach, w przeciwieństwie do korzyści płynących z prostej korekcji wzroku, które są widoczne natychmiast. Uproszczenie tych złożonych informacji do zrozumiałych terminów w ramach ograniczonego czasu konsultacji stanowi poważne wyzwanie, ale warto się tym zająć, ponieważ większość rodziców pozytywnie zareaguje na jasny komunikat, że można podjąć działania, aby zapobiec lub spowolnić przewidywane zmiany wzroku u ich dzieci. Standaryzowane narzędzia komunikacyjne, które upraszczają i wyjaśniają leczenie krótkowzroczności, mogą zwiększyć zrozumienie rodziców, wzmocnić zaufanie do zaleceń ECP i ostatecznie poprawić wdrażanie leczenia i jego wyniki.

Wyzwania kliniczne. Leczenie krótkowzroczności wiąże się z złożonymi wyzwaniami klinicznymi, które wykraczają poza proste zadanie aktualizacji recept na okulary. Dziedzina ta wymaga podejmowania subtelnych decyzji, a ewoluujące metody leczenia i wytyczne często dostarczają sprzecznych dowodów dotyczących skuteczności i bezpieczeństwa.^{293,294} Lekarze często borykają się z niepewnością przy identyfikowaniu odpowiednich kandydatów, leczeniu dzieci z przedmiotopią oraz postępowaniu krótkowzrocznością u dorosłych.²⁰¹ Brak jasnych protokołów dotyczących przerywania leczenia oraz konieczność ciągłego monitorowania, zwłaszcza w miarę wzrostu oka i postępującej krótkowzroczności, dodatkowo komplikują opiekę. Oprogramowanie wspomagające podejmowanie decyzji klinicznych mogłoby wspierać proces podejmowania decyzji klinicznych i

oferować spersonalizowaną, opartą na dowodach naukowych opiekę niezbędną w leczeniu krótkowzroczności.

Uzasadnienie wprowadzenia oprogramowania wspomagającego komunikację i podejmowanie decyzji.

Trwałe wyzwania i niepewności związane z leczeniem krótkowzroczności podkreślają potrzebę stosowania narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji, które zwiększają pewność klinicystów, poprawiają komunikację i dostarczają opartych na dowodach informacji umożliwiających podejmowanie świadomych decyzji klinicznych. Idealne oprogramowanie sprawiłoby, że leczenie krótkowzroczności stałoby się dostępne dla klinicystów, pacjentów i rodziców, zapewniając kilka kluczowych korzyści, w tym:

1. Ulepszone wytyczne kliniczne: aktualne, oparte na dowodach naukowych narzędzia dostosowane do indywidualnych potrzeb pacjentów pomogłyby lekarzom w radzeniu sobie ze złożonymi przypadkami leczenia krótkowzroczności, zmniejszając niepewność i zwiększając pewność siebie. Włączenie aktualnych wytycznych klinicznych pomogłoby również w zapewnieniu zgodności i zarządzania.
2. Skuteczna komunikacja z pacjentami: zautomatyzowane narzędzia dostarczające spersonalizowane, łatwe do zrozumienia informacje na temat ryzyka krótkowzroczności i opcji leczenia wypełniłyby lukę komunikacyjną między specjalistami ds. opieki okulistycznej a rodzicami. Narzędzia te mogłyby uprościć rozmowę, podkreślając korzyści płynące z leczenia, jednocześnie zachęcając do wcześniejszej interwencji i leczenia, co ostatecznie zwiększyłoby popularność leczenia.
3. Usprawniony przepływ pracy: Integracja z istniejącymi systemami elektronicznej dokumentacji medycznej zmniejszyłaby obciążenia administracyjne, zwalniając czas lekarzy na opiekę nad pacjentami poprzez usprawnienie przepływu pracy w placówkach medycznych.
4. Lepsze wyniki kliniczne: Dzięki wsparciu lepszego podejmowania decyzji, wcześniejszej identyfikacji ryzyka i kompleksowego monitorowania leczenia, narzędzia takie przyczyniłyby się do bardziej spójnego i skutecznego leczenia krótkowzroczności, optymalizując wyniki leczenia każdego dziecka.

Podstawowe cechy oprogramowania wspomagającego komunikację i podejmowanie decyzji.

Skuteczne oprogramowanie wspomagające podejmowanie decyzji powinno być niezawodne i oferować okulistom precyzyjne, zindywidualizowane i oparte na dowodach informacje. Kluczowe cechy, które takie oprogramowanie musi posiadać, aby było skuteczne w leczeniu krótkowzroczności, obejmują:

- Oparte na dowodach
Oprogramowanie powinno opierać się na najnowszych badaniach klinicznych i wykorzystywać solidne, międzynarodowe zbiory danych, aby zapewnić wiarygodne i reprezentatywne wskazówki. Modele obliczeniowe stanowiące podstawę jego zaleceń muszą odzwierciedlać najnowszą wiedzę naukową.
- Zatwierdzone klinicznie
Rygorystyczne testy w oparciu o dane kliniczne są niezbędne, aby zapewnić, że zalecenia oprogramowania są zarówno teoretycznie uzasadnione, jak i praktycznie skuteczne. Narzędzia zatwierdzone klinicznie budują zaufanie ECP do solidności oprogramowania.
- Indywidualne zastosowanie u pacjenta
Oprogramowanie musi zapewniać spersonalizowane wytyczne, uwzględniając kluczowe czynniki prognostyczne, takie jak refrakcja wyjściowa, długość osiowa, wiek, płeć i pochodzenie etniczne (²⁹⁵) oferując dostosowane do indywidualnych potrzeb informacje na temat postępów i reakcji na leczenie każdego pacjenta.

- Podwójne zastosowanie: wada refrakcji i długość osiowa. Oprogramowanie powinno integrować dane zarówno z monitorowania sferycznej równoważnej wady refrakcji, jak i długości osiowej, ponieważ oba te parametry mają kluczowe znaczenie dla oceny wyników leczenia. Uwzględniając oba parametry, oprogramowanie umożliwia kompleksowe podejście do leczenia krótkowzroczności. Powinno ono uwzględniać sytuacje, w których refrakcja cykloplegiczna nie jest dostępna, poprzez wprowadzenie odpowiednich korekt dla danych niecykloplegicznych, a gdy dane dotyczące długości osiowej są niedostępne, powinno wykorzystywać wartości keratometryczne do oszacowania długości osiowej.
- Możliwości bezpośredniego porównania. Narzędzia powinny umożliwiać bezpośrednie porównanie zmian wady refrakcji i długości osiowej, wykorzystując wskaźniki i wizualizacje, które pomagają specjalistom ECP śledzić ogólną skuteczność leczenia w obu wymiarach.
- Znaczące prognozy dla poszczególnych grup wiekowych. Oprogramowanie musi oferować prognozy postępu krótkowzroczności dostosowane do wieku pacjenta, pomagając specjalistom ECP przewidywać zmiany i odpowiednio dostosowywać plany leczenia. Prognozy te stanowią istotny punkt odniesienia dla długoterminowego leczenia.
- Monitorowanie i wskaźniki skuteczności leczenia. Aby śledzić postęp krótkowzroczności i skuteczność leczenia, obecnie dostępne są różne wskaźniki ¹⁶¹. Obejmują one:
 - *Porównania zmian bezwzględnych i wykresów centylowych*: śledzenie zmian refrakcji i długości osiowej oraz porównywanie ich ze standardowymi wykresami wzrostu centylowego.
 - *Tempo progresji i tempo wzrostu osiowego*: oblicza tempo progresji krótkowzroczności i wzrostu długości osiowej, dostosowane do czynników specyficznych dla pacjenta, takich jak wiek, płeć i pochodzenie etniczne.

Chociaż istniejące wskaźniki służące do monitorowania postępu krótkowzroczności i jej leczenia są przydatne, pochodzą one głównie z analiz badań klinicznych. Oprogramowanie wspomagające podejmowanie decyzji powinno priorytetowo traktować opracowanie ulepszonych wskaźników dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjentów w warunkach klinicznych, a nie w badaniach klinicznych. Pomoże to usprawnić złożony proces świadczenia spersonalizowanej opieki, umożliwiając lekarzom podejmowanie decyzji opartych na dowodach naukowych, skuteczną komunikację z rodzicami, a tym samym sprzyjając większej popularności leczenia i długotrwałej zgodności z zaleceniami bez poświęcania cennego czasu.

Sztuczna inteligencja w kontroli krótkowzroczności

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie zastosowaniami sztucznej inteligencji (AI) w okulistyce i naukach o wzroku. Tylko w 2023 r. w serwisie PubMed opublikowano ponad 1000 artykułów na ten temat. Większość tych publikacji dotyczy wykrywania chorób, takich jak retinopatia cukrzycowa ⁽²⁹⁶⁾, zwyrodnienie plamki związane z wiekiem ⁽²⁹⁷⁾, choroby przedniego odcinka oka i jaskra ⁽²⁹⁸⁾.

Ogólnie rzecz biorąc, sztuczna inteligencja działa poprzez zastosowanie modeli matematycznych lub algorytmów do dużych zbiorów danych w celu identyfikacji wzorców i formułowania prognoz. Algorytmy te często przechodzą początkowe fazy szkolenia i z czasem poprawiają swoją wydajność, gdy są narażone na coraz większe ilości danych. W przypadku wykrywania i monitorowania krótkowzroczności podejście to zależy od dostępnych danych, które można wykorzystać do szkolenia modeli sztucznej inteligencji ²⁹⁹.

uczenie maszynowe może wykorzystywać techniki statystyczne do analizy podstawowych danych demograficznych i pomiarów klinicznych, takich jak sferyczna równoważna wada refrakcji, długość osiowa, keratometria i ostrość wzroku. Tymczasem głębokie uczenie się, będące podzbiorem uczenia maszynowego, doskonale radzi sobie z rozpoznawaniem skomplikowanych wzorców na obrazach medycznych, takich jak te wytwarzane przez topografy rogówki lub aparaty do fotografowania dna oka. ²⁴⁴

Rola sztucznej inteligencji w przewidywaniu postępu krótkowzroczności. Model uczenia maszynowego typu random forest oparty na 10-letnich danych dotyczących refrakcji pochodzących z elektronicznej dokumentacji medycznej w Chinach wykazał wysoką dokładność prognozowania nawet do ośmiu lat, z limitami zgodności od 0,0 D do 0,8 D rzeczywistej wartości po ośmiu latach. ⁷ Inne modele uwzględniające czynniki behawioralne, takie jak ilość aktywności w pomieszczeniach i na świeżym powietrzu, dieta, nawyki związane z czytaniem i korzystaniem z telefonu komórkowego, wykazały wysoką dokładność prognozowania. ³⁰⁰ Ponadto przetestowano różne algorytmy uczenia maszynowego, w tym regresję liniową i regresję logistyczną, w celu prognozowania takich aspektów, jak wydłużenie osiowe ³⁰¹ i ostrość widzenia w oczach z wysoką krótkowzrocznością. ³⁰²

Rola sztucznej inteligencji w wykrywaniu patologii krótkowzroczności.

Wykrywanie zmian patologicznych związanych z wysoką krótkowzrocznością, takich jak staphyloma, makulopatia krótkowzroczna, przechylenie tarczy nerwu wzrokowego i zanik naczyńówki i siatkówki ³⁰³, może być również trudne, zwłaszcza we wczesnych stadiach choroby krótkowzroczności. Metody głębokiego uczenia się, takie jak konwolucyjne sieci neuronowe, wykazały wysoką dokładność w wykrywaniu zmian w dnie oka u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością ⁽³⁰⁴⁾ (-) ⁽³⁰⁶⁾. Sztuczna inteligencja została również wykorzystana do zbadania genetycznych składników krótkowzroczności. Na przykład algorytmy uczenia maszynowego zidentyfikowały 23 geny o zróżnicowanej ekspresji związane z krótkowzrocznością, z których cztery były wysoce skutecznymi biomarkerami diagnostycznymi. ³⁰⁴⁻³⁰⁶ Oprócz wykrywania patologicznej krótkowzroczności i związanych z nią zmian dna oka, sztuczna inteligencja oparta na głębokim uczeniu się została również wykorzystana do klasyfikacji zmian dna oka związanych z krótkowzrocznością, w tym neowaskularyzacji naczyńówki, zaniku okołotarczowego i mozaiki dna oka. ³⁰⁷⁻³¹⁴

Chociaż klasyfikacja zmian dna oka związanych z krótkowzrocznością może być stosowana klinicznie, algorytmy głębokiego uczenia się sztucznej inteligencji mogą również pomóc w zrozumieniu struktur oka. Proces ten umożliwił badanie zmian naczyńówki u pacjentów z krótkowzrocznością ⁽²⁴⁾ oraz szkolenie rezydentów okulistyki w zakresie rozpoznawania patologicznej krótkowzroczności poprzez interpretację obrazów dna oka ⁽³¹⁵⁾ oraz oznaczanie warstw naczyńówki i siatkówki u pacjentów z wysoką krótkowzrocznością ⁽³¹⁶⁾.

Rola sztucznej inteligencji w leczeniu krótkowzroczności.

Zbadano również możliwe zastosowania sztucznej inteligencji w niektórych dostępnych metodach leczenia krótkowzroczności, w tym ortokorekcji ^{317,318} i miejscowym stosowaniu atropiny ³¹⁹. W badaniu retrospektywnym stwierdzono, że uczenie maszynowe pozwala lepiej oszacować głębokość strefy powrotu i kąt strefy ładowania czterech kwadrantów soczewki ortokorekcyjnej niż trzy inne metody, w tym tradycyjna metoda karty przesuwnej dostarczana przez producenta ⁽³¹⁷⁾. Zastosowano wiele modeli uczenia maszynowego do retrospektywnego badania wpływu 19 czynników na ciśnienie wewnątrzgałkowe u dzieci z krótkowzrocznością leczonych miejscowo atropiną ⁽³¹⁹⁾.

Podobnie jak w przypadku każdej technologii, sztuczna inteligencja wymaga uwzględnienia ważnych kwestii związanych z jej właściwym wykorzystaniem. Dwie główne kwestie, które należy zawsze brać pod uwagę w przypadku sztucznej inteligencji, to ogólna przydatność i stronniczość wyników ³²⁰. Zbiory danych wykorzystywane do opracowywania algorytmów sztucznej inteligencji mogą zawierać stronniczości związane z pochodzeniem etnicznym, płcią, stosowanymi technikami/sprzętem lub innymi czynnikami.

TABELA. Oprzyrządowanie do praktyki klinicznej i badań w zakresie leczenia krótkowzroczności

Technika kliniczna	Metodologia	Praktyka kliniczna	Badania kliniczne
Refrakcja cykloplegiczna	• 1 kropla 1% cyklopentolatu LUB • 2 krople 1% tropikamidu	Niezbędne* — podczas pierwszej wizyty, a następnie w odpowiednich odstępach czasu	Niezbędne dla podstawowych mierników wyników
Refrakcja obiektywna	• Retinoskopia • Autorefrakcja w polu otwartym • Autorefrakcja w polu zamkniętym	Niezbędne — podczas pierwszej i kolejnych wizyt	Niezbędne — zazwyczaj stosowane w warunkach otwartych
Subiektywna refrakcja Odpowiednia	• Subiektywna refrakcja	Preferowana przez lekarzy starsze dzieci — potwierdzenie obiektywnych wyników	Nieistotne Zazwyczaj nie jest to podstawowy miernik wyniku
Długość osiowa (biometria)	• PCI • OLCR • OCT	Preferowane	Niezbędna — podstawowy miernik wyników badań klinicznych
Topografia/tomografia (krzywizna rogówki)	• Odbicie • Projekcja	Niezbędny dla pacjentów stosujących ortokorekcję klinicznego	Zależne od badania
Obiektywna pupilometria	• Światło podczerwone • Oprogramowanie dla urządzeń mobilnych	Preferowany dla pacjentów stosujących ortokorekcję	W
Ocena zespołu suchego oka	• Mikroskopia szczelinowa • Wideokeratografia • Meibografia • Hartmann-Shack	zależności od wyników badań klinicznych Preferowany wyników badań klinicznych	Zależny od
Aberrometria	• Tscherning • Śledzenie promieni • Piramidalne wykrywanie fali czołowej	Nieistotne klinicznych	Zależne od wyników badań
Obrazowanie tylnego odcinka oka	• Kamera dna oka • Skanujący oftalmoskop laserowy • OCT	Preferowane — do monitorowania pacjentów	W zależności od badania klinicznego

* W zakresie w jakim pozwala na to zakres praktyki.

czynniki, które mogą prowadzić do powstania algorytmów stronicznych lub przynajmniej algorytmów o ograniczonej heterogeniczności lub zastosowaniu ³²¹. Nieprzejrzystość modeli uczenia maszynowego, często nazywanych systemami „czarnej skrzynki”, stanowi wyzwanie dla zrozumienia ich wewnętrznego działania, a tym samym trafności założeń przyjętych przez te algorytmy. Podobnie jak w przypadku wielu innych zaawansowanych technologii w opiece zdrowotnej, pojawiają się również obawy etyczne dotyczące nierównego dostępu, pogłębiającego dysproporcje w opiece nad pacjentami. Inne kwestie etyczne związane ze sztuczną inteligencją obejmują bezpieczeństwo danych, świadomą zgodę, prywatność, odpowiedzialność i wiarygodność decyzji podejmowanych przez systemy sztucznej inteligencji ⁽³²²⁾. Idealna sytuacja kliniczna prawdopodobnie wykorzystuje sztuczną inteligencję do wspomagania podejmowania decyzji klinicznych, a nie do ich zastępowania, i wymaga, aby modele sztucznej inteligencji były oparte na dużych, zróżnicowanych zbiorach danych. Jednak sprostanie tym wyzwaniom ma zasadnicze znaczenie dla skutecznego i etycznego stosowania sztucznej inteligencji w opiece zdrowotnej.

PODSUMOWANIE

Rosnąca częstość występowania krótkowzroczności spowodowała rozwój zaawansowanych narzędzi diagnostycznych i terapeutycznych. Instrumenty kliniczne odgrywają kluczową rolę w kontroli krótkowzroczności, umożliwiając lekarzom pomiar wad refrakcji, długości osiowej, reakcji akomodacyjnych i stanu zdrowia oczu. Chociaż aberrometry falowe dostarczają cennych informacji na temat aberracji wyższego rzędu i optyki oka, ich zastosowanie pozostaje w dużej mierze ograniczone do badań naukowych, a nie do rutynowej praktyki klinicznej. Natomiast pomiar długości osiowej jest podstawą leczenia krótkowzroczności, a technologie takie jak PCI, OLCR i OCT ze źródłem rozpraszającym zapewniają bardzo precyzyjne i powtarzalne dane.

Nowoczesna aparatura zapewnia precyzyjne i powtarzalne pomiary, które mają kluczowe znaczenie dla monitorowania postępów i oceny skuteczności metod leczenia krótkowzroczności. W tabeli podsumowano dostępną aparaturę oraz jej znaczenie dla praktyki klinicznej i badań naukowych. Wykorzystując odpowiednie technologie, lekarze mogą zoptymalizować opiekę nad pacjentami, skutecznie monitorować postęp krótkowzroczności i poprawić wyniki leczenia w walce z globalną epidemią krótkowzroczności.

Podziękowania

Wsparcie Międzynarodowego Instytutu Krótkowzroczności. Koszty publikacji i rozpowszechniania raportów Międzynarodowego Instytutu Krótkowzroczności zostały pokryte dzięki darowiznom od Brien Holden Vision Institute, Carl Zeiss Vision, CooperVision, Essilor-Luxottica, Hoya, Thea, Alcon i Oculus.

Ujawnienie informacji: **D. Jones**, CooperVision (C, R), Hoya (C, F, R), Essilor (C, F, R), SightGlass Vision (C, R), Zeiss (R), Johnson & Johnson Vision (F); **A. Chow**, Hoya (C); **D. Fadel**, Bausch & Lomb (R), Boston Materials (R), Contamac (R), Eaglet Eye (R), EasyLac (R), Mediwork (R), Medlac (R), Multilens (R), Oculus (R), Topcon healthcare (R), Wave Software (R); **J.M. Gonzalez Meijome**, Alcon (F), Essilor (F), Fitlens-Rimondi (F), Precilens (F), Pauné Vision (F); **A. Grzybowski**, Thea (C, F, R), Polpharma (C, R), Viatriis (C, R), Santen (C, R), InView (C), Eyerising (C, R), Essilor (C), Beijing Zhipu Sunshine Health Management Co. (C, R), Alcon (C, F, R), Bausch & Lomb (F), Zeiss, Teleon (F), J&J, Coop-erVision (F), Hoya (F), Essilor (F, R), Polpharma (F, R), Viatriis (F), In View (R); **P. Kollbaum**, Alcon (F), CooperVision (F), EssilorLuxottica (C, F), Hoya (F), Johnson and Johnson Vision (F), SightGlass Vision (C, F); **J. Loughman**, Coopervision (F), Dopavision (F, C), EssilorLuxottica (F), OcuMension (F), Alliance Pharma (F), OcuMera (O); **J. Wolffsohn**, Alcon (C), Coopervi-

sion (C), Dopavision (C), SightGlass (F, C), Międzynarodowy Instytut Krótkowzroczności (S)

Referencje

- Flitcroft DI, He M, Jonas JB, et al. IMI – Definiowanie i klasyfikacja krótkowzroczności: Proponowany zestaw standardów dla badań klinicznych i epidemiologicznych. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2019;60(3):M20–M30.
- Elliott DB. What is the appropriate gold standard test for refractive error? *Ophthalmic Physiol Opt.* 2017;37:111–117.
- Morgan IG, Iribarren R, Fotouhi A, Grzybowski A. Refraktometria cykloplegiczna jest złotym standardem w badaniach epidemiologicznych dotyczących krótkowzroczności. *Acta Ophthalmol.* 2019;93:81–87.
- Wolffsohn JS, Kollbaum PS, Berntsen DA, et al. IMI – kliniczne badania kontroli krótkowzroczności i raport dotyczący oprzyrządowania. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2019;60(3):M132–M160.
- Harvey EM, Miller JM, Wagner LK, Dobson V. Powtarzalność i dokładność pomiarów za pomocą ręcznego autorefraktometru u dzieci. *Br J Ophthalmol.* 1997;81:941–948.
- Steele G, Ireland D, Block S. Wyniki autorefrakcji cykloplegicznej u dzieci w wieku przedszkolnym przy użyciu urządzeń Nikon Retino-max Plus i Welch Allyn SureSight. *Optom Vis Sci.* 2003;80:73–77.
- Schmitz T, Lagreze WA. Dokładność nowego fotorefraktometru u młodych i dorosłych pacjentów. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2000;243:637–641.
- Sanfilippo PG, Chu BS, Bigault O, et al. Jaki jest odpowiedni wiek graniczny dla cykloplegii w refrakcji? *Acta Ophthalmol.* 2014;92(6):e48–e462.
- Twelker JD, Mutti DO. Retinoskopia u niemowląt z wykorzystaniem techniki bez cykloplegii z użyciem w bliskiego, cykloplegii z użyciem tropikamidu 1% i cykloplegii z użyciem cyklopentolatu 1%. *Optom Vis Sci.* 2001;78:21–222.
- Sankaridurg P, He X, Naduvilath T, et al. Porównanie autorefrakcji bez cykloplegii i z cykloplegią w klasyfikacji danych dotyczących wad refrakcji u dzieci. *Acta Ophthalmol.* 2017;9(7):e633–e640.
- Sun YY, Wei SF, Li SM i in. Refrakcja cykloplegiczna przy użyciu 1% cyklopentolatu w badaniu u młodych dorosłych: czy jest to złoty standard? Badanie oczu studentów Uniwersytetu Anyang (AUSES). *Br J Ophthalmol.* 2018;103:64–68.
- Wilson LB, Melia M, Kraker RT, et al. Dokładność autorefraktometrii u dzieci: raport Amerykańskiej Akademii Okulistyki Refrakcyjnej. *Ophthalmology.* 2020;127:129–1267.
- Guo X, Shakarchi AF, Block SS, Friedman DS, Repka MX, Collins ME. Refraktometria bez cykloplegii w porównaniu z refraktometrią z cykloplegią w populacji dzieci w wieku szkolnym w Chicago. *Ophthalmology.* 2022;129:813–820.
- Hagen LA, Gilson SJ, Baraas RC. Potrzeba refrakcji autorefraktometrycznej z cykloplegią u nastolatków i młodych dorosłych. *Scand J Optom Vis Sci.* 2023;16(1):1–7.
- Mimouni M, Zoller L, Horowitz J, Wygnanski-Jaffe T, Morad Y, Mezer E. Autorefrakcja cykloplegiczna u młodych dorosłych: czy jest obowiązkowa? *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2016;24:391–398.
- Wilson S, Ctori I, Shah R, Suttle C, Conway ML. Systematyczny przegląd i metaanaliza zgodności refrakcji bez cykloplegii i z cykloplegią u dzieci. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2022;42:1276–1288.
- Manny RE, Hussein M, Scheiman M, et al. Tropikamid (1%): skuteczny środek cykloplegiczny dla dzieci z krótkowzrocznością. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2001;42:1728–1731.
- Yazdani N, Sadeghi R, Momeni-Moghaddam H, Zarifmah-moudi L, Ehsaei A. Porównanie cykloplegii cyklopentolanowej i tropikamidowej: przegląd systematyczny i metaanaliza. *J Optom.* 2018;11:13–143.
- Mutti DO, Zadnik K, Egashira S, Kish L, Twelker JD, Adams AJ. Wpływ cykloplegii na pomiary elementów oka. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1994;33:1–27.
- Kleinsteinst RN, Mutti DO, Manny RE, Shin JA, Zadnik K. Cykloplegia u dzieci afroamerykańskich. *Optom Vis Sci.* 1999;76:102–107.
- Fan DS, Rao SK, Ng JS, Yu CB, Lam DS. Badanie porównawcze dotyczące bezpieczeństwa i skuteczności różnych środków cykloplegicznych u dzieci z ciemną pigmentacją tęczówki. *Clin Exp Ophthalmol.* 2004;32:462–467.
- Mukash SN, Kayembe DL, Mwanza JC. Zgodność między retinoskopią, autorefraktometrią i refrakcją subiektywną w określaniu wad refrakcji u dzieci z Konga. *Clin Optom (Auckl).* 2021;13:129–136.
- McCullough SJ, Doyle L, Saunders KJ. Powtarzalność wewnątrz- i międzybadacza cykloplegicznej retinoskopii u małych dzieci. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2017;37:16–23.
- Jones LW, Hodes DT. Możliwe reakcje alergiczne na chlorowodorek cyklopentolatu: opisy przypadków wraz z przeglądem literatury dotyczącej zastosowań i działań niepożądanych. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1991;11:16–21.
- Yeotikar NS, Chandra Bakaraju R, Roopa Reddy PS, Prasad K. Refrakcja cykloplegiczna i refrakcja niecykloplegiczna z użyciem przeciwnieległego zamglenia: badanie porównawcze. *J Mod Opt.* 2007;4:1317–1324.
- Chiu NN, Rosenfield M, Wong LC. Wpływ przeciwnieległego zamglenia podczas oceny wad refrakcji. *J Am Optom Assoc.* 1997;68:30–308.
- Ting PW, Schmid KL, Lam CS, Edwards MH. Obiektywny pomiar w czasie rzeczywistym krótkowzroczności instrumentalnej u mikroskopistów w różnych warunkach widzenia. *Vision Res.* 2006;46:234–2362.
- Wang D, Jin N, Pei RX, et al. Porównanie działania dwóch autorefraktorów podczas badań przesiewowych wzroku na dużą skalę wśród chińskich dzieci w wieku szkolnym. *Int J Ophthalmol.* 2020;13:1660–1666.
- Farook M, Venkatramani J, Gazzard G, Cheng A, Tan D, Saw SM. Porównanie ręcznego autorefraktometru, autorefraktometru stomowego i refrakcji subiektywnej u dorosłych w Singapurze. *Optom Vis Sci.* 2000;82:1066–1070.
- Choong YF, Chen AH, Goh PP. Porównanie autorefrakcji i refrakcji subiektywnej z cykloplegią i bez cykloplegii u dzieci w wieku szkolnym. *Am J Ophthalmol.* 2006;142:68–74.
- Oral Y, Gunaydin N, Ozgur O, Arsan AK, Oskan S. Porównanie różnych autorefraktorów z retinoskopią u dzieci. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus.* 2012;49:370–377.
- Venkataraman AP, Brautaset R, Dominguez-Vicent A. Wpływ sześciu różnych konstrukcji autorefraktometrów na precyzję i dokładność pomiaru wad refrakcji. *PLoS One.* 2022;17(11):e0278269.
- Wesemann W, Dick B. Dokładność i zdolność akomodacyjna ręcznego autorefraktometru. *J Cataract Refract Surg.* 2000;26:62–70.
- Bharadwaj SR, Sravani NG, Little JA i in. Empiryczna zmienność w kalibracji ekscentrycznej refrakcji opartej na nachyleniu. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2013;30:923–931.
- Kuo YC, Wang JH, Chiu CJ. Porównanie autorefrakcji w polu otwartym, autorefrakcji w polu zamkniętym i retinoskopii w pomiarach refrakcji u dzieci i młodzieży na Tajwanie. *J Formos Med Assoc.* 2020;119:12/1–12/8.
- Davies LN, Mallen EA, Wolffsohn JS, Gilmartin B. Ocena kliniczna Shin-Nippon NVision-K /001/Grand Seiko WR-100K autorefractor. *Optom Vis Sci.* 2003;80:320–324.

37. Moore KE, Berntsen DA. Powtarzalność autorefraktometrii centralnej i obwodowej w oczach zdrowych. *Optom Vis Sci.* 2014;91:1106–1112.
38. Salvesen S, Kohler M. Automated refraction. A comparative study of automated refraction with the Nidek AR-1000 autorefractor and retinoscopy. *Acta Ophthalmol (Copenh).* 1991;69:342–346.
39. Wallman J, Winawer J. Homeostaza wzrostu oka i kwestia krótkowzroczności. *Neuron.* 2004;43:447–468.
40. Hartwig A, Charman WN, Radhakrishnan H. Podstawowa refrakcja obwodowa w badaniu i zmiany refrakcji osiowej w ciągu jednego roku w populacji młodych dorosłych. *J Optom.* 2016;9:32–39.
41. Schmid GF. Zmienność nachylenia siatkówki w tylnym biegunie u dzieci w wieku 7–11 lat. *Curr Eye Res.* 2003;27:61–68.
42. Logan NS, Gilmartin B, Wildsoet CF, Dunne MC. Kontur tylnej części siatkówki u dorosłych osób z anizometrią. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2004;45:212–2162.
43. Millodot M. Wpływ ametropii na refrakcję obwodową. *Am J Optom Physiol Opt.* 1981;8:691–697.
44. Mutti DO, Sholtz RI, Friedman NE, Zadnik K. Refrakcja obwodowa i kształt oka u dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2000;41:1022–1030.
45. Rempt F, Hoogerheide J, Hoogenboom WP. Retinoskopia obwodowa i skiagram. *Ophthalmologica.* 1971;162:1–10.
46. Fedtke C, Ehrmann K, Holden BA. Przegląd technik refrakcji obwodowej. *Optom Vis Sci.* 2009;86:429–446.
47. Lundstrom LRR. Aberracje obwodowe. W: Group TF, red. *Handbook of Visual Optics, tom pierwszy.* Boca Raton, Floryda: CRC Press; 2017.
48. Lundstrom L, Gustafsson J, Svensson I, Unsbo P. Assessment of objective and subjective eccentric refraction. *Optom Vis Sci.* 2000;82:298–306.
49. Wang YZ, Thibos LN, Lopez N, Salmon T, Bradley A. Subiektywna refrakcja pola peryferyjnego przy użyciu ostrości wykrywania kontrastu. *J Am Optom Assoc.* 1996;67:84–89.
50. Mathur A, Atchison DA. Obwodowe wzorce refrakcji przy dużych kątach pola widzenia. *Optom Vis Sci.* 2013;90:140–147.
51. Osuagwu UL, Suheimat M, Wolffsohn JS, Atchison DA. Trafność refrakcji obwodowej autorefraktometru Shin-Nippon SRW/000. *Optom Vis Sci.* 2016;93:12/4–1261.
52. Demir P, Macedo AF, Chakraborty R, Baskaran K. Porównanie autorefraktometru z otwartym polem widzenia z aberrometrem z otwartym polem widzenia w określaniu refrakcji obwodowej u dzieci. *J Optom.* 2023;16:20–29.
53. Zhang H, Lam CSY, Tang WC, et al. Na skuteczność kontroli krótkowzroczności wpływa wyjściowa względna refrakcja obwodowa u dzieci noszących okulary z soczewkami wielosegmentowymi z wbudowanym defokusem (DIMS). *J Clin Med.* 2022;11: 2294–2294.
54. Zhang HY, Lam CSY, Tang WC, Leung M, To CH. Soczewki okularowe z wieloma segmentami z wbudowanym efektem defokusa zmieniły względną refrakcję obwodową: 2-letnie randomizowane badanie kliniczne. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2020;61(7): /3.
55. Bao T, Qin L, Hou G, et al. Związek między defokusem obwodowej siatkówki a krótkowzrocznością na podstawie wielospektralnej topografii refrakcji u chińskich dzieci. *Clin Ophthalmol.* 2024;18:17–23.
56. Fernandez EJ, Sager S, Lin Z, et al. Instrument do szybkiej refrakcji obwodowej całego pola widzenia w ludzkim oku. *Biomed Opt Express.* 2022;13:2947–29/9.
57. Lin H, Long E, Ding X, et al. Prognozowanie rozwoju krótkowzroczności wśród chińskich dzieci w wieku szkolnym przy użyciu Dane dotyczące refrakcji z elektronicznej dokumentacji medycznej: retrospektywne, wieloosrodkowe badanie z wykorzystaniem uczenia maszynowego. *PLoS Med.* 2018;1(11):e1002674.
58. Xiaoli L, Xiangyue Z, Lihua L, et al. Badanie porównawcze względnej refrakcji obwodowej u dzieci z różnym stopniem krótkowzroczności. *Front Med (Lausanne).* 2022;9: 8006/3.
59. Vincent SJ, Cho P, Chan KY, et al. CLEAR – ortokorekcja. *Cont Lens Anterior Eye.* 2021;44:240–269.
60. Courville CB, Smolek MK, Klyce SD. Wkład powierzchni oka w optykę wzrokową. *Exp Eye Res.* 2004;78:417–427.
61. Iskander DR, Wachel P, Simpson PN, Consejo A, Jesus DA. Zasady działania, dokładność i precyzja profilera powierzchni oka. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2016;36:266–278.
62. Liu Z, Pflugfelder SC. Regularność powierzchni rogówki i wpływ sztucznych łez w przypadku niedoboru łez wodnistych. *Ophthalmology.* 1999;106:939–943.
63. Klein SA. Krzywizna osiowa i błąd skośnego promienia w topografii rogówki. *Optom Vis Sci.* 1997;74:931–944.
64. Klijn S, Reus NJ, Sicam VA. Ocena keratometrii za pomocą nowatorskiego topografu rogówki Color-LED. *J Refract Surg.* 2011;31:249–2/6.
65. Sicam VA, Van der Heijde RGL. Rekonstrukcja topograficzna cech przedniej powierzchni rogówki asymetrycznej względem obrotu. *Optom Vis Sci.* 2006;83:910–918.
66. Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Obrazowanie i walidacja niepełnego stożka rogówki za pomocą nowatorskiej topografii wielopunktowej. *Case Rep Ophthalmol.* 2013;4:199–209.
67. Kanellopoulos AJ, Asimellis G. Korelacja kliniczna między topografią Placido, Scheimpflug i LED z odbiciem kolorowym w obrazowaniu bliznowatej rogówki. *Case Rep Ophthalmol.* 2014;3:311–317.
68. Swartz T, Marten L, Wang M. Pomiar rogówki: najnowsze osiągnięcia w topografii rogówki. *Curr Opin Ophthalmol.* 2007;18:327–333.
69. Drexler W, Morgner U, Ghanta RK, Kartner FX, Schuman JS, Fujimoto JG. Ultrahigh-resolution ophthalmic optical coherence tomography. *Nat Med.* 2001;7:102–107.
70. Ramos JL, Li Y, Huang D. Zastosowania kliniczne i badawcze optycznej tomografii koherencyjnej przedniego odcinka oka – przegląd. *Clin Exp Ophthalmol.* 2009;37:81–89.
71. Wolffsohn JS, Peterson RC. Obrazowanie przedniego odcinka oka. *Clin Exp Optom.* 2006;89:207–214.
72. Wegener A, Laser H. Obrazowanie przestrzennego rozkładu gęstości na torebce soczewki za pomocą fotografii Scheimpfluga. *Ophthalmic Res.* 1996;28(Suppl 2):86–91.
73. Fan R, Chan TC, Prakash G, Jhanji V. Zastosowania topografii i tomografii rogówki: przegląd. *Clin Exp Ophthalmol.* 2018;46:133–146.
74. Zou X, Nagino K, Yee A, et al. Związek między zespołem suchego oka a krótkowzrocznością: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Heliyon.* 2024;10(19):e38674.
75. Li BQ, Zhang FJ. [Postępy badań nad krótkowzrocznością u dzieci z zespołem suchego oka]. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi.* 2024;60:193–199.
76. Hou J, Zhang N, Li X, Wang Z, Wang J. Wpływ okularów lub ortokorekcji na film łzowy u dzieci i młodzieży. *Ophthalmol Ther.* 2023;12:1913–1927.
77. Li L, Lai T, Zou J, et al. Wpływ soczewek ortokorekcyjnych na film łzowy i gruczoły łzowe oraz kontrolę jednostronnej krótkowzroczności u dzieci. *Front Cell Dev Biol.* 2023;11:1197262.
78. Garcia-Porta N, Rico-Del-Viejo L, Martin-Gil A, Carracedo G, Pintor J, Gonzalez-Mejome JM. Różnice w objawach suchości oczu w dwóch różnych metodach

- stosowania soczewek kontaktowych: silikonowo-hydrożelowych do codziennego noszenia i ortokorekcji nocnej. *Biomed Res Int*. 2016;2016:124284/.
79. Wolffsohn JS, Arita R, Chalmers R, et al. TFOS DEWS II Raport dotyczący metodologii diagnostycznej. *Ocul Surf*. 2017;17:39–74.
 80. Fadel D. Medmont Meridia: znacznie więcej niż topograf rogówki. *Clin Optom (Auckl)*. 2023;17:283–301.
 81. Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, Thibos LN, Bradley A. Walidacja klinicznego aberrometru Shack-Hartmanna. *Optom Vis Sci*. 2003;80:87–99.
 82. Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, Thibos LN, Bradley A. Powtarzalność pomiarów klinicznego aberrometru Shack-Hartmanna. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2004;43:1–60.
 83. Hartmann J. Bemerkungen über den bau und die justierung von spektrographen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. 1900;20:47.
 84. Kollbaum P, Cheng X, Himebaugh N, Thibos LN, Bradley A. Stabilność pomiarów abermetrycznych w praktyce klinicznej. *J Vision*. 2002;2(10):122–122.
 85. Liang J, Grimm B, Goelz S, Bille JF. Obiektywny pomiar aberracji falowych ludzkiego oka przy użyciu czujnika fali Hartmanna-Shacka. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 1994;11:1949–197.
 86. Shack RV, Platt BC. Produkcja i zastosowanie soczewkowego ekranu Hartmanna. *J Opt Soc Am*. 1971;61:648–697.
 87. D'Oria F, Scotti G, Sborgia A, Boscia F, Alessio G. Jak wiarygodna jest abermetria oparta na piramidalnym czujniku fali w pomiarze zachowania optycznego wieloogniskowych soczewek wewnątrzgałkowych () in vivo? *Sensors (Basel)*. 2023;23:3/34.
 88. Rozema JJ, Van Dyck DE, Tassignon MJ. Porównanie kliniczne 6 aberrometrów. Część 1: specyfikacje techniczne. *J Cataract Refract Surg*. 2000;31:1114–1127.
 89. Foucault L. Memoire sur la construction des telescopes en verre argente. *Ann Observ Imperial Paris*. 18/9:197–237.
 90. Akondi V, Castillo S, Vohnsen B. Cyfrowy piramidalny czujnik fali czołowej z regulowaną modulacją. *Opt Express*. 2013;21:18261–18272.
 91. Daly EM, Dainty C. Pomiar fal czołowych w okulistyce za pomocą wszechstronnego czujnika piramidalnego. *Appl Opt*. 2010;49(31):G67–G77.
 92. Singh NK, Jaskulski M, Ramasubramanian V, et al. Walidacja klinicznego aberrometru wykorzystującego piramidalny czujnik fal czołowych. *Optom Vis Sci*. 2019;96:733–744.
 93. Almutairi MS, Altoaimi BH, Bradley A. Akomodacja i zachowanie źrenicy u osób z wczesną przeziębnią widzących obustronnie. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2017;37:128–140.
 94. Altoaimi BH, Almutairi MS, Kollbaum P, Bradley A. Zachowanie akomodacyjne oczu noszących asferyczne soczewki kontaktowe z pojedynczym ogniskiem (single-). *Optom Vis Sci*. 2017;94:971–980.
 95. Singh NK, Meyer D, Jaskulski M, Kollbaum P. Defokus siatkówki u osób z krótkowzrocznością noszących soczewki kontaktowe z podwójnym ogniskiem strefowym. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2022;42:8–18.
 96. Ramasubramanian V, Logan NS, Jones S, et al. Myopia control dose delivered to treated eyes by a dual-focus myopia-control contact lens. *Optom Vis Sci*. 2023;100:376–387.
 97. Sah RP, Meyer D, Jaskulski M, et al. Wpływ geometrii strefy na wprowadzenie defokusa krótkowzrocznego w oczach młodych dorosłych noszących soczewki wielostrefowe. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2023;43:1110–1124.
 98. Altoaimi BH, Kollbaum P, Meyer D, Bradley A. Badanie eksperymentalne akomodacji w oczach wyposażonych w wieloogniskowe soczewki kontaktowe przy użyciu klinicznego autorefraktometru. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2018;38:1/2–163.
 99. Smith EL, 3rd, Hung LF, Huang J, Arumugam B. Wpływ miejscowego rozogniskowania krótkowzrocznego na rozwój refrakcji u małp. *Optom Vis Sci*. 2013;90:1176–1186.
 100. Walther G, Meyer D, Richards J, Rickert M, Kollbaum P. Centracja miękkich soczewek kontaktowych na oku. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2024;44:737–741.
 101. Born M, Wolf E. *Zasady optyki: teoria elektromagnetyczna propagacji, interferencji i dyfrakcji światła*. St. Louis: Elsevier; 2013.
 102. Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT, Webb R, science VSTMV, its a. Standardy raportowania aberracji optycznych oczu. *J Refract Surg*. 2002;18(1):S6/2–S660.
 103. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Applegate R. Metryka jakości optycznej oka. *J Vision*. 2003;3:1–3.
 104. Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, Sarver EJ. Interakcja między aberracjami w celu poprawy lub zmniejszenia wydajności wzrokowej. *J Cataract Refract Surg*. 2003;29(8):1487–1491.
 105. Applegate RA, Marsack JD, Thibos LN. Metryka jakości obrazu siatkówki pozwala przewidzieć wydajność wzrokową oczu o ostrości widzenia 20/17 lub lepszej. *Optom Vis Sci*. 2006;83:63–640.
 106. Carvalho LA. Dokładność wielomianów Zernike'a w charakteryzowaniu aberracji optycznych i powierzchni rogówki oka. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2000;46:191–1926.
 107. Gantes-Nunez J, Jaskulski M, Lopez-Gil N, Kollbaum PS. Charakterystyka optyczna dwóch nowych soczewek okularowych do kontroli krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2023;43:388–401.
 108. Jaskulski M, Singh NK, Bradley A, Kollbaum PS. Właściwości optyczne i obrazowe nowatorskich wielosegmentowych soczewek okularowych zaprojektowanych w celu spowolnienia postępu krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2020;40:49–16.
 109. Klyce SD, Karon MD, Smolek MK. Zalety i wady rozszerzenia Zernike'a do przedstawiania aberracji falowej normalnego i aberracyjnego oka. *J Refract Surg*. 2004;20:S37–S41.
 110. Southwell WH. Oszacowanie frontu fali na podstawie pomiarów nachylenia frontu fali. *J Optical Soc Am*. 1980;70:998–1006.
 111. Panagopoulou SI, Neal DR. Iteracyjna metoda macierzy strefowej do rekonstrukcji frontu falowego na podstawie pomiarów gradientu. *J Refract Surg*. 2000;21(1):S/63–S/69.
 112. Bang SP, Jung H, Li KY, Yoon G. Porównanie pomiarów modalnych i strefowych frontu falowego soczewek wewnątrzgałkowych o rozszerzonej głębi ostrości refrakcyjnej. *Biomed Opt Express*. 2024;15:1618–1629.
 113. Nam J, Thibos LN, Iskander DR. Opis aberracji oka za pomocą map zbieżności fali. *Clin Exp Optom*. 2009;92:194–201.
 114. Thibos LN. Obliczanie geometrycznej funkcji rozmycia punktowego na podstawie aberracji czoła fali. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2019;39:232–244.
 115. Kollbaum P, Jansen M, Thibos L, Bradley A. Walidacja aberrometru falowego Shack-Hartmanna do soczewek kontaktowych poza okiem. *Optom Vis Sci*. 2008;8(9):E817–E/28.
 116. Kollbaum PS, Bradley A, Thibos LN. Porównanie właściwości optycznych miękkich soczewek kontaktowych na oku i poza okiem. *Optom Vis Sci*. 2013;90:924–936.
 117. Ruiz-Alcocer J. Analiza profilu mocy nowych miękkich soczewek kontaktowych stosowanych w leczeniu postępującej krótkowzroczności. *J Optom*. 2017;10:266–268.
 118. Sha J, Tilia D, Diec J, et al. Wydajność wizualna miękkich soczewek kontaktowych kontrolujących krótkowzroczność u osób z krótkowzrocznością bez przeziębii. *Clin Optom (Auckl)*. 2018;10:7–86.
 119. Campbell FW. Głębina ostrości ludzkiego oka. *Optica Acta*. 1974;1/7–164.
 120. Campbell FW, Gregory AH. Wpływ wielkości źrenicy na ostrość widzenia. *Nature*. 1960;187:1121–1123.
 121. Mathot S. Pupillometria: psychologia, fizjologia i funkcja. *J Cogn*. 2018;1:16.

122. Mathot S, Ivanov Y. Wpływ wielkości źrenicy i jasności obwodowej na zdolność wykrywania i rozróżniania. *PeerJ*. 2019;7:e8220.
123. Martinez CE, Applegate RA, Klyce SD, McDonald MB, Medina JP, Howland HC. Wpływ rozszerzenia źrenicy na aberracje optyczne rogówki po fotorefraktywnej keratektomii. *Arch Ophthalmol*. 1998;116:103–1062.
124. Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC, El Danasoury MA. Porównanie aberracji falowej rogówki po fotorefraktywnej keratektomii i laserowej keratomileusis in situ. *Am J Ophthalmol*. 1999;127:1–7.
125. Oshika T, Tokunaga T, Samejima T, Miyata K, Kawana K, Kaji Y. Wpływ średnicy źrenicy na związek między aberracją wyższego rzędu a wrażliwością na kontrast po laserowej korekcji wzroku metodą LASIK. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2006;47:1334–1338.
126. Wang Y, Zhao K, Jin Y, Niu Y, Zuo T. Zmiany aberracji wyższego rzędu przy różnych rozmiarach źrenicy w oku krótkowzrocznym. *J Refract Surg*. 2003;19(2 Suppl):S270–S274.
127. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Applegate RA. Dokładność i precyzja obiektywnej refrakcji na podstawie aberracji falowej. *J Vis*. 2004;4(4):329–/1.
128. Cardona G, Lopez S. Średnica źrenicy, odległość robocza i oświetlenie podczas wykonywania codziennych czynności. Implikacje dla soczewek kontaktowych do widzenia symultanicznego w przypadku prezbiopii. *J Optom*. 2016;9:78–84.
129. Madrid-Costa D, Ruiz-Alcocer J, Garcia-Lazaro S, Ferrer-Blasco T, Montes-Mico R. Rozkład mocy optycznej refrakcyjnych i asferycznych soczewek wieloogniskowych: wpływ wielkości źrenicy. *Cont Lens Anterior Eye*. 2011;38:317–321.
130. Wagner S, Conrad F, Bakaraju RC, Fedtke C, Ehrmann K, Holden BA. Profile mocy soczewek miękkich jednoogniskowych i wieloogniskowych typu „”. *Cont Lens Anterior Eye*. 2011;38:2–14.
131. Applegate RA, Thibos LN, Hilmantel G. Optyka aberroscopii i superwidzenia. *J Cataract Refract Surg*. 2001;27:1093–1107.
132. Liang J, Williams DR. Aberracje i jakość obrazu siatkówkowego w normalnym oku ludzkim. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 1997;14:2873–2883.
133. Thibos LN, Bradley A, Zhang XX. Wpływ aberracji chromatycznej oka na widzenie jednooczne. *Optom Vis Sci*. 1991;68:599–607.
134. Bradley A, Nam J, Xu R, Harman L, Thibos L. Wpływ geometrii strefy soczewki kontaktowej i optyki oka na jakość obrazu dwuogniskowego siatkówki. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2014;34:331–34/.
135. Plainis S, Atchison DA, Charman WN. Profile mocy soczewek wieloogniskowych i ich interpretacja. *Optom Vis Sci*. 2013;90:1066–1077.
136. Chia A, Chua WH, Cheung YB, et al. Atropina w leczeniu krótkowzroczności u dzieci: bezpieczeństwo i skuteczność dawek 0,0%, 0,1% i 0,01% (Atropina w leczeniu krótkowzroczności 2). *Ophthalmology*. 2012;119:347–3/4.
137. Chia A, Lu QS, Tan D. Pięcioletnie badanie kliniczne dotyczące stosowania atropiny w leczeniu krótkowzroczności 2: kontrola krótkowzroczności za pomocą kropli do oczu zawierających 0,01% atropiny. *Okulistyka*. 2016;123:391–399.
138. Chen Z, Niu L, Xue F, et al. Wpływ średnicy źrenicy na wzrost osiowy w ortokorekcji. *Optom Vis Sci*. 2012;89:1636–1640.
139. Davidova P, Biller M, Ademmer V, Kohnen T. Pomiar wielkości źrenicy za pomocą wielofunkcyjnego aberrometru/interferometru koherencyjnego/tomografu i dwóch pupilometrów na podczerwień. *J Cataract Refract Surg*. 2024;0:631–636.
140. Mathur A, Gehrmann J, Atchison DA. Wpływ luminancji i bodźców akomodacyjnych na wielkość źrenicy i położenie jej środka. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2014;55:2166–2172.
141. Maqsood F, Schumacher U. Wpływ zmiennych warunków oświetleniowych i wad refrakcji na wielkość źrenicy. *Cogent Medicine*. 2017;4(1):1338824.
142. Guggerell D, Gollan B, Stolte M, Ansorge U. Badanie zmian wielkości źrenicy w zależności od wymagań zadania i treści emocjonalnej w sytuacji wywiadu klinicznego. *Appl Sci*. 2024;14:11714.
143. Pop M, Payette Y, Santoriello E. Porównanie karty źrenicy i pupilometru w pomiarze wielkości źrenicy. *J Cataract Refract Surg*. 2002;28:283–288.
144. Couret D, Boumaza D, Grisotto C, et al. Wiarygodność standardowej praktyki pomiaru źrenicy w neurointensywnej terapii: obserwacyjne badanie z podwójnie ślepą próbą. *Crit Care*. 2016; 20:99.
145. Suys T, Bouzat P, Marques-Vidal P, et al. Automatyczna ilościowa pupilometria do prognozowania śpiączki po zatrzymaniu akcji serca. *Neurocrit Care*. 2014;21:300–308.
146. Zhao W, Stutzman S, DaiWai O, Saju C, Wilson M, Aiya-gari V. Wiarygodność międzyurządzeniowa pupilometru NPi-100. *J Clin Neurosci*. 2016;33:79–82.
147. Khanani AM, Archer SM, Brown SM. Poziome i pionowe średnice źrenicy przystosowanej do ciemności u osób zdrowych. *J Cataract Refract Surg*. 2004;30:2//7–2//8.
148. Leng L, Yuan Y, Chen Q, et al. Biometria przedniego odcinka oka ludzkiego na południkach poziomych i pionowych podczas akomodacji, obrazowana za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej o rozszerzonej głębokości skanowania. *PLoS One*. 2014;9(8):e10477/.
149. McAnany JJ, Smith BM, Garland A, Kagen SL. Pupilometria oparta na iPhone: nowatorskie podejście do oceny odruchu źrenicznego. *Optom Vis Sci*. 2018;95:9/3–9/8.
150. Richards J, Jaskulski M, Rickert M, Kollbaum P. Zachowania dzieci związane z korzystaniem z urządzeń cyfrowych. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2024;44:46–/3.
151. Taberner J, Atchison DA, Markwell EL. Aberracje i położenie źrenicy w warunkach topografii rogówki i oświetlenia Hartmann-Shack. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2009;0:1964–1970.
152. Win-Hall DM, Houser J, Glasser A. Statyczna i dynamiczna akomodacja mierzona za pomocą autorefraktometru WAM-//00. *Optom Vis Sci*. 2010;87:873–882.
153. Arba Mosquera S, Verma S, McAlinden C. Oś centracji w chirurgii refrakcyjnej. *Eye Vis (Lond)*. 2011;2:4.
154. Salmon TO, Thibos LN. Niewspółosiowość linii widzenia w wideokeratioskopie i jej wpływ na pomiary aberracji rogówki i wewnętrznych aberracji oka. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 2002;19:6/7–669.
155. Thibos LN. Jak mierzyć aberrację chromatyczną i lokalizować użyteczne osie odniesienia ludzkiego oka. Prezentacja podczas konferencji OSA; 199/; Portland.
156. Artal P, Marcos S, Iglesias I, Green DG. Transfer modulacji optycznej i czułość kontrastu przy przesuniętych małych źrenicach w ludzkim oku. *Vision Res*. 1996;36:3/7–3/86.
157. Porter J, Yoon G, Lozano D, et al. Aberracje wywołane podczas laserowej chirurgii refrakcyjnej z wykorzystaniem fali przewodzącej, spowodowane przesunięciami między naturalną a rozszerzoną źrenicą centrum . *J Cataract Refract Surg*. 2006;32:21–32.
158. Chopra R, Mulholland PJ, Petzold A, et al. Automated pupil-lometry using a prototype binocular optical coherence tomography system. *Am J Ophthalmol*. 2020;214:21–31.
159. Chow S-C. Biometria to pomiary i obliczenia dotyczące ludzkiego ciała. *J Biometrics Biostat*. 2021;127:7.
160. Tideman JW, Snabel MC, Tedja MS, et al. Związek długości osiowej z ryzykiem nieuleczalnego upośledzenia wzroku u Europejczyków z krótkowzrocznością. *JAMA Ophthalmol*. 2016;134:13/–1363.
161. Brennan NA, Toubouti YM, Cheng X, Bullimore MA. Skuteczność w kontroli krótkowzroczności. *Progr Retinal Eye Res*. 2021;83:100923.

162. Gifford KL, Richdale K, Kang P, et al. IMI – Raport dotyczący wytycznych dotyczących postępowania klinicznego. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2019;60(3):M184–M203.
163. Tideman JW, Polling JR, Vingerling JR, et al. Axial length growth and the risk of developing myopia in European children. *Acta Ophthalmol*. 2018;96:301–309.
164. Mutti DO, Hayes JR, Mitchell GL, et al. Refractive error, axial length, and relative peripheral refractive error before and after the onset of myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007;48:2/10–2/19.
165. Mutti DO, Sinnott LT, Zadnik K, Group BS, the CSG. Kompensacja wydłużenia komory szklistej w okresie niemowlęcym i dziecięcym. *Optom Vis Sci*. 2023;100:43–/1.
166. Brennan NA, Shamp W, Maynes E, Cheng X, Bullimore MA. Wpływ wieku i rasy na wydłużenie osiowe u dzieci z krótkowzrocznością: przegląd systematyczny i metaregresja. *Optom Vis Sci*. 2024;101:497–07.
167. Chow AHY, Mungalsingh MA, Thai D, et al. Przydatność urządzeń wielofunkcyjnych Myah i Myopia Master do monitorowania postępu krótkowzroczności u dzieci i dorosłych. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2024;44:1017–1030.
168. Huang J, McAlinden C, Su B, et al. Wpływ cykloplegii na biometrię Lenstar i IOLMaster. *Optom Vis Sci*. 2012;89:1691–1696.
169. Zhu H, Liu C, Gao M, Zhang S, Zhang L, Zhao Q. Grubość naczyńki w odniesieniu do dioptrii i długości osiowej u dzieci z krótkowzrocznością. *Front Med (Lausanne)*. 2023;10:12413/2.
170. Wolffsohn JS, Davies LN. Postępy w obrazowaniu przedniego odcinka oka. *Curr Opin Ophthalmol*. 2007;18:32–38.
171. Kurtz D, Manny R, Hussein M, Group CS. Zmienność pomiarów składników oka metodą ultrasonografii A-scan () u dzieci. *Optom Vis Sci*. 2004;81:3–43.
172. Urbak SF. Biomikroskopia ultrasonograficzna. I. Precyzja pomiarów ultrasonograficznych. *Acta Ophthalmol Scand*. 1998;76:447–4//.
173. Urbak SF. Biomikroskopia ultrasonograficzna. III. Dokładność i zgodność pomiarów. *Acta Ophthalmol Scand*. 1999;77:293–297.
174. Urbak SF, Pedersen JK, Thorsen TT. Biomikroskopia ultrasonograficzna. II. Powtarzalność pomiarów wewnątrzobserwacyjna i międzyobserwacyjna. *Acta Ophthalmol Scand*. 1998;76:46–49.
175. Hitzenger CK. Optyczny pomiar osiowej długości gałki ocznej za pomocą interferometrii laserowej Dopplera. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1991;32:616–624.
176. Drexler W, Findl O, Menapace R, et al. Interferometria częściowej koherencji: nowatorskie podejście do biometrii w chirurgii zaćmy. *Am J Ophthalmol*. 1998;126:24–34.
177. Bolz M, Prinz A, Drexler W, Findl O. Liniowa zależność między zmianami refrakcyjnymi i biometrycznymi soczewki podczas akomodacji w oczach emmetropicznych i krótkowzrocznych. *Br J Ophthalmol*. 2007;91:360–36//.
178. Drexler W, Baumgartner A, Findl O, Hitzenger CK, Sattmann H, Fercher AF. Submikrometrowa precyzja biometrii przedniego odcinka oka ludzkiego. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1997;38:1304–1313.
179. Carkeet A, Saw SM, Gazzard G, Tang W, Tan DT. Powtarzalność biometrii IOLMaster u dzieci. *Optom Vis Sci*. 2004;81:829–834.
180. Garcia Ardoy E, Mateos N, Roda L, Torrado Sierra O, Baptista AM, Serra PM. Powtarzalność i zgodność biometrów opartych na optycznej tomografii koherencyjnej ze źródłem rozproszonym i interferometrii częściowej koherencji u osób z krótkowzrocznością. *Clin Exp Optom*. 2023;106:783–792.
181. Hussin HM, Spry PG, Majid MA, Gouws P. Wiarygodność i trafność interferometrii częściowej spójności w pomiarze długości osiowej oka u dzieci. *Eye (Londyn, Anglia)*. 2006;20:1021–1024.
182. Kimura S, Hasebe S, Miyata M, Hamasaki I, Ohtsuki H. Pomiar długości osiowej za pomocą interferometrii częściowej koherencji u dzieci z krótkowzrocznością: powtarzalność pomiaru i porównanie z elementami refrakcyjnymi. *Jpn J Ophthalmol*. 2007;1:10–110.
183. Mattern AI, Neller K, Devenijn M, et al. Porównanie biometrów optycznych stosowanych u dzieci w celu kontroli krótkowzroczności. *Klin Monbl Augenheilkd*. 2023;240:1306–1313.
184. Verkicharla PK, Mallen EA, Atchison DA. Powtarzalność i porównanie długości obwodowej oka przy użyciu dwóch instrumentów. *Optom Vis Sci*. 2013;90:21–222.
185. Fercher AF, Mengedoh K, Werner W. Pomiar długości oka za pomocą interferometrii z wykorzystaniem światła częściowo spójnego. *Opt Lett*. 1988;13:186–188.
186. Santodomingo-Rubido J, Mallen EA, Gilmartin B, Wolffsohn JS. Nowe bezkontaktowe urządzenie optyczne do biometrii oka. *Br J Ophthalmol*. 2002;86:4/8–462.
187. Chamarty S, Verkicharla PK. Dokładność i precyzja nowego optycznego biometru przeznaczonego do leczenia krótkowzroczności w pomiarze biometrii oka. *Optom Vis Sci*. 2023;100:74–7/0.
188. Rauscher FG, Hiemisch A, Kiess W, Michael R. Wykonano i powtarzalność pomiarów biometrycznych oka za pomocą urządzenia Lenstar LS 900 w dużej grupie dzieci i młodzieży. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2021;41:12–22.
189. Guo B, Lau JK, Cheung SW, Cho P. Powtarzalność i odtwarzalność ręcznego pomiaru grubości naczyńki przy użyciu obrazów Lenstar u dzieci przed i po leczeniu ortokeratologicznego. *Cont Lens Anterior Eye*. 2022;4(4):101484.
190. Read SA, Collins MJ, Alonso-Caneiro D. Walidacja optycznej biometrii siatkówki i naczyńki za pomocą reflektometrii o niskiej spójności. *Optom Vis Sci*. 2011;88:8//–863.
191. Puech M. [Trudne przypadki w pomiarach biometrycznych]. *J Fr Ophthalmol*. 2003;26:28–31.
192. Leighton RE, Breslin KM, Saunders KJ, McCullough SJ. Ocena urządzenia IOLMaster 700 i jego zgodności z urządzeniem IOLMaster v3 u dzieci. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2022;42:48–8.
193. Spaide RF, Koizumi H, Pozzoni MC. Ulepszona tomografia optyczna koherencyjna w dziedzinie spektralnej do obrazowania głębi. *Am J Ophthalmol*. 2008;146:496–/00.
194. Zhang L, Buitendijk GH, Lee K, et al. Trafność automatycznej segmentacji naczyńki w SS-OCT i SD-OCT. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011;52:3202–3211.
195. Ostrin LA, Harb E, Nickla DL, et al. IMI — dynamiczna naczyńka: nowe spostrzeżenia, wyzwania i potencjalne znaczenie dla krótkowzroczności u ludzi. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2023;64(6):4.
196. Fink W. Metoda korekcji refrakcji dla zdjęć Scheimpfluga zarejestrowanych cyfrowym urządzeniem CCD za pomocą śledzenia promieni. *J Biomed Opt*. 2001;10(2):024003.
197. Sardari S, Khabazkhoob M, Jafarzadehpour E, Fotouhi A. Powtarzalność pomiarów długości osiowej przy użyciu systemu opartego na Scheimpflugu. *J Ophthalmic Vis Res*. 2023;18:396–404.
198. Optometryści. TCo. Leczenie krótkowzroczności u dzieci: wytyczne dla optometrystów. Dostępne pod adresem: <https://www.college-optometrists.org/category-landing-pages/clinical-topics/myopia/myopia-management—guidance-for-optometrists>. Dostęp: 10 czerwca 2024 r.
199. Lingham G, Loughman J, Panah DS, et al. The long and short of it: a comprehensive assessment of axial length estimation in myopic eyes from ocular and demographic variables. *Eye (London)*. 2024;38:1333–1341.
200. Wolffsohn JS, Whayeb Y, Logan NS, Weng R, Ambassador Międzynarodowego Instytutu Krótkowzroczności G. Globalne trendy w podejściu do leczenia krótkowzroczności i strategiach stosowanych w praktyce klinicznej – aktualizacja z 2022 r. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2023;64(6):6.

- praktyce klinicznej – aktualizacja z 2022 r. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2023;64(6):6.
201. Coverdale S, Rountree L, Webber K, et al. Eyecare practitioner perspectives and attitudes towards myopia and myopia management in the UK. *BMJ Open Ophthalmol.* 2024;9(1):e00127.
 202. Di Pierdomenico J, Gonzalez-Gonzalez R, Valiente-Soriano FJ, Galindo-Romero C, Garcia-Ayuso D. Postawy i wiedza hiszpańskich optometrystów na temat leczenia krótkowzroczności. *Int Ophthalmol.* 2023;43:4247–4261.
 203. McCrann S, Flitcroft I, Loughman J. Czy optometria jest gotowa na kontrolę krótkowzroczności? Edukacja i inne bariery w leczeniu krótkowzroczności. *HRB Open Res.* 2019;2:30.
 204. Naik A, Karthikeyan SK, Ramesh JJ, Bhaskar S, Ganapathi CA, Biswas S. Wgląd w wiedzę, perspektywę i praktyki indyjskich optometrystów w zakresie krótkowzroczności dziecięcej. *Vision (Basel).* 2024;8(2):22.
 205. Bullimore MA, Gilmartin B, Royston JM. Stała akomodacja i biometria oka w krótkowzroczności późnej. *Doc Ophthalmol.* 1992;80:143–151.
 206. French AN, O'Donoghue L, Morgan IG, Saunders KJ, Mitchell P, Rose KA. Porównanie refrakcji i biometrii oka metodą u europejskich dzieci rasy kaukaskiej mieszkających w Irlandii Północnej i Sydney w Australii. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2012;53:4021–4031.
 207. Gwiazda J, Marsh-Tootle WL, Hyman L, Hussein M, Norton TT, Group CS. Podstawowe pomiary refrakcji i składników oka u dzieci biorących udział w badaniu oceniającym korekcję krótkowzroczności (COMET). *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2002;43:314–21.
 208. van AG. O emmetropii i ametropii. *Optica acta.* 1961;142(Suppl):1–92.
 209. Dutt D, Yazar S, Charng J, Mackey DA, Chen FK, Sampson DM. Korekcja błędu powiększenia w pomiarach obszaru beznacyniowej strefy plamki żółtej na obrazach angiografii optycznej tomografii koherencyjnej z oszacowaną długością osiową. *Eye Vis (Lond).* 2022;9:29.
 210. He X, Zou H, Lu L, et al. Stosunek długości osiowej do promienia rogówki: związek ze stanem refrakcji i rola w wykrywaniu krótkowzroczności w połączeniu z ostrością wzroku u chińskich dzieci w wieku szkolnym. *PLoS One.* 2011;10(2):e0111766.
 211. Kim HS, Yu DS, Cho HG, Moon BY, Kim SY. Porównanie przewidywanej i zmierzonej długości osiowej dla projektowania soczewek okulistycznych. *PLoS One.* 2019;14(1):e0210387.
 212. Morgan PB, McCullough SJ, Saunders KJ. Oszacowanie długości osiowej oka na podstawie konwencjonalnych pomiarów optometrycznych. *Cont Lens Anterior Eye.* 2020;43:18–20.
 213. Queiros A, Amorim-de-Sousa A, Fernandes P, Ribeiro-Queiros MS, Villa-Collar C, Gonzalez-Mejome JM. Mathematical estimation of axial length increment in the control of myopia progression. *J Clin Med.* 2022;11:6200.
 214. Galvis V, Tello A, Rey JJ, Serrano Gomez S, Prada AM. Oszacowanie długości osiowej oka na podstawie parametrów optometrycznych nie jest dokładne. *Cont Lens Anterior Eye.* 2022;4(3):101448.
 215. Gordon RA, Donzis PB. Rozwój refrakcji ludzkiego oka. *Arch Ophthalmol.* 1981;99:78–789.
 216. Bullimore MA, Lee SS, Schmid KL, et al. IMI — początek i postęp krótkowzroczności u młodych dorosłych. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2023;64(6):2.
 217. Flitcroft DI. Emmetropizacja i etiologia wad refrakcji. *Eye (Londyn).* 2014;28:169–179.
 218. Grosvenor T, Scott R. Trzyletnie zmiany refrakcji i jej składników w krótkowzroczności występującej w młodości i wczesnej dorosłości. *Optom Vis Sci.* 1993;70:677–683.
 219. Jorge J, Almeida JB, Parafita MA. Zmiany refrakcji, biometryczne i topograficzne wśród portugalskich studentów kierunków ścisłych: trzyletnie badanie podłużne. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2007;27:287–294.
 220. Kinge B, Midelfart A, Jacobsen G, Rystad J. Zmiany biometryczne w oczach norweskich studentów uniwersytetów — trzyletnie badanie podłużne. *Acta Ophthalmol Scand.* 1999;77:648–652.
 221. Lin LL, Shih YF, Lee YC, Hung PT, Hou PK. Zmiany refrakcji oka i jej składników wśród studentów medycyny — badanie podłużne trwające / roku. *Optom Vis Sci.* 1996;73:491–498.
 222. Parssinen O, Kauppinen M, Viljanen A. Postęp krótkowzroczności od momentu jej wystąpienia w wieku 8–12 lat do dorosłości oraz wpływ dziedziczności i czynników zewnętrznych na postęp krótkowzroczności. 23-letnie badanie obserwacyjne. *Acta Ophthalmol.* 2014;92:730–739.
 223. Lee KE, Klein BE, Klein R, Quandt Z, Wong TY. Związek wieku, wzrostu i wykształcenia z wymiarami oka w starszej populacji rasy białej. *Arch Ophthalmol.* 2009;127:88–93.
 224. Ojaimi E, Rose KA, Morgan IG i in. Rozkład parametrów biometrycznych oka i refrakcji w badaniu populacyjnym australijskich dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2001;46(8):2748–54.
 225. Roy A, Kar M, Mandal D, Ray RS, Kar C. Zmiany wymiarów osiowych oka w zależności od wieku, płci, wzrostu, BMI i ich związek z refrakcją. *J Clin Diagn Res.* 2011;9(1):AC01–AC04.
 226. Shih Y-F, Lin LL, Hung T. Badania biometrii oka na Tajwanie — przegląd. *J Med Ultrasound.* 2007;1:9–18.
 227. Cruickshank FE, Logan NS. Optyczne „tłumienie” stosunku wady refrakcji do długości osiowej: implikacje dla pomiarów wyników w badaniach nad kontrolą krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2018;38:290–297.
 228. Ip JM, Huynh SC, Kifley A, et al. Zróżnicowanie wpływu długości osiowej i innych parametrów okulistycznych na refrakcję w zależności od wieku i pochodzenia etnicznego. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2007;48:4846–4853.
 229. Jong M, Sankaridurg P, Naduvilath TJ, Li W, He M. Związek między postępowaniem stosunku długości osiowej do promienia krzywizny rogówki a sferycznym równoważnikiem refrakcji w krótkowzroczności. *Optom Vis Sci.* 2018;95:921–929.
 230. Lee J, Jeon W, Kim MS, et al. Charakterystyka morfologiczna osób z wysoką krótkowzrocznością powikłaną surowiczym odwarstwieniem siatkówki z kopułową plamką żółtą lub dolnym staphylomą [opublikowano online przed drukiem 2 marca 2022 r.]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, doi:10.1007/s00417-021-06802-z.
 231. Shao Y, Shen M, Lu F, Ye J. Asymetria kwadrantowa zmian zwyrodnienia głębokiego siatkówki nacyniowego w patologicznej krótkowzroczności. *J Transl Med.* 2021;23:378.
 232. Chun RKM, Zhang H, Liu Z, et al. Soczewki okularowe z wieloma segmentami defokusa (DIMS) zwiększają grubość nacyniówki: dwuletnie randomizowane badanie kliniczne. *Eye Vis (Lond).* 2023;10:39.
 233. Lee SS, Alonso-Caneiro D, Lingham G, et al. Pogrubienie nacyniówki w młodym wieku dorosłym i wyjściowa grubość nacyniówki pozwalają przewidzieć zmianę wady refrakcji. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2022;63(1):34.
 234. Li Z, Hu Y, Cui D, Long W, He M, Yang X. Zmiana grubości nacyniówki podplamkowej wtórna do ortokorekcji i jej zaprzestania: czynnik prognostyczny zmiany długości osiowej. *Acta Ophthalmol.* 2019;97(3):e44–e49.
 235. Li Z, Wang W, Liu R, et al. Grubość nacyniówki pozwala przewidzieć postęp makulopatii u osób z wysoką krótkowzrocznością: 2-letnie badanie podłużne. *Br J Ophthalmol.* 2021;104:1744–1750.
 236. Xiang K, Wang J, Zhu Z, et al. Zmiany grubości nacyniówki u dzieci z przedmiopią po wielokrotnej terapii światłem czerwonym o niskim natężeniu i ich rola w przewidywaniu zapobiegania krótkowzroczności i kontrolowaniu przesunięcia krótkowzroczności. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila).* 2021;14(2):10011/.

237. Xiong R, Zhu Z, Jiang Y, et al. Zmiany podłużne i wartość predykcijna grubości naczyniówki w kontroli krótkowzroczności po wielokrotnej terapii światłem czerwonym o niskim natężeniu. *Okulistyka*. 2023;130:286–296.
238. Wolffsohn JS. Posterior eye imaging. W: Wolffsohn JS, red. *Ophthalmic Imaging*. Oxford, Wielka Brytania: Butterworth-Heinemann; 2008:81–103.
239. Toslak D, Liu C, Alam MN, Yao X. Miniaturowa oftalmoskopia pośrednia z wykorzystaniem światła bliskiej podczerwieni do fotografii dna oka bez rozszerzania źrenicy. *Opt Lett*. 2018;43:2/1–2/4.
240. Coleman AL, Haller JA, Quigley HA. Określenie rzeczywistej wielkości obiektów dna oka na podstawie zdjęć dna oka. *J Glaucoma*. 1996;4:433–437.
241. Rudnicka AR, Burk RO, Edgar DF, Fitzke FW. Charakterystyka powiększenia systemów obrazowania dna oka. *Ophthalmology*. 1998;10:2186–92.
242. Mahurkar AA, Vivino MA, Trus BL, Kuehl EM, Datiles MB, 3rd, Kaiser-Kupfer MI. Tworzenie fotomontaży dna oka. Nowa metoda komputerowa. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1996;37:167–1683.
243. Asakawa K, Kato S, Shoji N, Morita T, Shimizu K. Ocena głowy nerwu wzrokowego przy użyciu nowo opracowanej techniki stereoskopowego obrazowania siatkówki przez specjalistę ds. jaskry i certyfikowanego optyzystę niebędącego ekspertem. *J Glaucoma*. 2013;22:698–706.
244. Foo LL, Lim GYS, Lanca C, et al. System głębokiego uczenia się do przewidywania ryzyka wysokiej krótkowzroczności w ciągu / roku przy użyciu obrazowania dna oka u dzieci. *NPJ Digit Med*. 2023;6(1):10.
245. Tang J, Yuan M, Tian K, et al. System automatycznej klasyfikacji i segmentacji zmian chorobowych w przypadku makulopatii krótkowzrocznej oparty na sztucznej inteligencji i wykorzystujący kolorowe zdjęcia dna oka wykonane techniką. *Transl Vis Sci Technol*. 2022;11(6):16.
246. Sharp PF, Manivannan A, Xu H, Forrester JV. Skanujący oftalmoskop laserowy z optyką adaptacyjną () – przegląd jego roli w naukach biologicznych i medycynie. *Phys Med Biol*. 2004;49:108–1096.
247. Roorde A, Romero-Borja F, Donnelly Iii W, Queener H, Hebert T, Campbell M. Adaptacyjna optyka skaningowej oftalmoskopii laserowej. *Opt Express*. 2002;10:40–412.
248. Lee J, Sagong M. Obrazowanie siatkówki w ultra szerokim polu widzenia: zasady działania technologii i zastosowania kliniczne. *J Retina*. 2016;1:1–10.
249. Nakao N, Igarashi-Yokoi T, Takahashi H, Xie S, Shino-hara K, Ohno-Matsui K. Ilościowa ocena tylnych staphylomów w oczach z wysoką krótkowzrocznością za pomocą ultraszerokokątnej optycznej tomografii koherencyjnej. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2022;63(8):20.
250. Fang Y, Du R, Nagaoka N, et al. Kryteria diagnostyczne oparte na OCT dla różnych stadiów makulopatii krótkowzrocznej. *Ophthalmology*. 2019;126:1018–1032.
251. Ng DSC, Cheung CYL, Luk FO, et al. Postępy w optycznej tomografii koherencyjnej () w krótkowzroczności i patologicznej krótkowzroczności. *Eye*. 2016;30:901–916.
252. Fontaine M, Gaucher D, Sauer A, Speeg-Schatz C. Grubość naczyniówki i ametropia u dzieci: badanie podłużne. *Eur J Ophthalmol*. 2017;27:730–734.
253. Meng QY, Miao ZQ, Liang ST, et al. Grubość naczyniówki, krótkowzroczność i interwencje mające na celu kontrolę krótkowzroczności u dzieci: metaanaliza i przegląd systematyczny. *Int J Ophthalmol*. 2023;16:4/3–464.
254. Read SA, Fuss JA, Vincent SJ, Collins MJ, Alonso-Caneiro D. Zmiany naczyniówki w krótkowzroczności u ludzi: spostrzeżenia na podstawie obrazowania optycznej tomografii koherencyjnej. *Clin Exp Optom*. 2019;102:270–287.
255. Muhiddin HS, Mayasari AR, Umar BT i in. Grubość naczyniówki w korelacji z długością osiową i stopniem krótkowzroczności. *Vision (Basel)*. 2022;6(1):16.
256. Lau JK, Cheung SW, Collins MJ, Cho P. Powtarzalność pomiarów grubości naczyniówki za pomocą obrazów OCT Spectralis. *BMJ Open Ophthalmol*. 2019;4(1):e000237.
257. Tan Q, Ng AL, Cheng GP, Woo VC, Cho P. Badanie dotyczące połączenia 0,01% atropiny z ortokorekcją w kontroli krótkowzroczności u dzieci (AOK): 2-letnie randomizowane badanie kliniczne. *Cont Lens Anterior Eye*. 2023;46(1):101723.
258. Yang Y, Wei L, Wang B, Zheng W. Wpływ atropiny na grubość naczyniówki u dzieci z krótkowzrocznością: metaanaliza. *Front Pharmacol*. 2024;15:1440180.
259. Zadnik K, Sinnott LT, Cotter SA i in. Prognozowanie krótkowzroczności u młodzieży. *JAMA Ophthalmol*. 2011;133:683–689.
260. Mutti DO, Sinnott LT, Mitchell GL, et al. Względna wada refrakcji obwodowej a ryzyko wystąpienia i postępu krótkowzroczności u dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011;52:199–207.
261. Atchison DA, Pritchard N, Schmid KL. Refrakcja obwodowa wzdłuż poziomego i pionowego pola widzenia w krótkowzroczności. *Vis Res*. 2006;46(8–9):14/0–14/8.
262. Queiros A, Amorim-de-Sousa A, Lopes-Ferreira D, Villa-Collar C, Gutierrez AR, Gonzalez-Mejome JM. Względna refrakcja obwodowa w 4 meridianach po ortokeratologii i zabiegu LASIK. *Eye Vis (Lond)*. 2018;3:12.
263. Pusti D, Benito A, Madrid-Valero JJ, Ordonana JR, Artal P. Wpływ czynników genetycznych i środowiskowych na refrakcję obwodową. *Transl Vis Sci Technol*. 2024;13(10):33.
264. Sager S, Vicente-Jaen A, Lin Z, et al. Refrakcja peryferyjna w bardzo szerokim kącie za pomocą urządzenia do skanowania laserowego. *Biomed Opt Express*. 2024;15:6486–6498.
265. Xi X, Hao J, Lin Z, et al. Dwuwymiarowa refrakcja obwodowa u osób dorosłych. *Biomed Opt Express*. 2023;14:2377–2387.
266. Zhang HY, Xu FY, Liu KKK, et al. Leczenie krótkowzroczności w Hongkongu. *J Clin Med*. 2021;10:698.
267. Mutti DO, Mitchell GL, Jones-Jordan LA, et al. Stosunek AC/A przed i po wystąpieniu krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2017;58:1/94–1602.
268. Shih YF, Chiang TH, Lin LL. Zmiany grubości soczewki u dzieci w wieku szkolnym na Tajwanie. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2009;50:2637–2644.
269. Zhang J, Jin L, Chen Q, et al. Zmiany grubości i mocy soczewki przed i po wystąpieniu krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2022;63(3):36.
270. Atchison DA, Li SM, Li H i in. Względna nadwzroczność obwodowa nie pozwala przewidzieć rozwoju i postępu krótkowzroczności u dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2011;52:6162–6170.
271. Lee SH, Tsai PC, Chiu YC, Wang JH, Chiu CJ. Postęp krótkowzroczności po zaprzestaniu stosowania atropiny u dzieci: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Front Pharmacol*. 2024;15:1343698.
272. Lee SS, Lingham G, Clark A, Read SA, Alonso-Caneiro D, Mackey DA. Zmiany w naczyniówce podczas i po zaprzestaniu długotrwałego leczenia 0,01% atropiną w celu kontroli krótkowzroczności. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2024;65(10):21.
273. Liu Z, Sun Z, Du B, et al. Wpływ powtarzanej terapii światłem czerwonym o niskim natężeniu na strukturę i unaczynienie naczyniówki i siatkówki u dzieci z krótkowzrocznością. *Ophthalmol Ther*. 2024;13:739–749.
274. Xiong R, Zhu Z, Jiang Y, et al. Trwały i odbity efekt powtarzanej terapii światłem czerwonym o niskim natężeniu na kontrolę krótkowzroczności: 2-letnie badanie kontrolne po zakończeniu próby. *Clin Exp Ophthalmol*. 2022;50:1013–1024.
275. Amorim-de-Sousa A, Paune J, Silva-Leite S, Fernandes P, Gonzalez-Mejome JM, Queiros A. Zmiany grubości naczyniówki i aktywności siatkówki przy stosowaniu soczewek kontaktowych kontrolujących krótkowzroczność. *J Clin Med*. 2023;12(11):3618.
276. Huang Y, Li X, Zhuo Z, et al. Wpływ soczewek okularowych z asferycznymi soczewkami na grubość naczyniówki u dzieci z krótkowzrocznością: 3-letnie badanie obserwacyjne. *Eye Vis (Lond)*. 2024;11(1):16.

277. Xiao J, Pan X, Hou C, Wang Q. Zmiany grubości naczyńwłók podplamkowej po ortokorekcji u dzieci z krótkowzrocznością: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Curr Eye Res.* 2024;49:683–690.
278. Zhou Y, Zhu Y, Huang XB, et al. Zmiany grubości naczyńwłók u dzieci po krótkotrwałym stosowaniu 1% żelu atropinowego. *Ophthalmic Res.* 2023;66:421–430.
279. Flitcroft DI. Złożone interakcje czynników siatkówkowych, optycznych i środowiskowych w etiologii krótkowzroczności. *Prog Retin Eye Res.* 2012;31:622–660.
280. Ohno-Matsui K, Kawasaki R, Jonas JB, et al. Międzynarodowy system klasyfikacji i oceny fotograficznej makulopatii krótkowzrocznej. *Am J Ophthalmol.* 2011;149:877–883.
281. Li M, Yang D, Shen Y, et al. Zastosowanie rozszerzenia źrenicy i sterowania okiem w obrazowaniu ultraszerokokątnym do wykrywania zmian obwodowych siatkówki u pacjentów z krótkowzrocznością. *Br J Ophthalmol.* 2023;107:1018–1024.
282. Marcus MW, de Vries MM, Junoy Montolio FG, Jansoni NM. Krótkowzroczność jako czynnik ryzyka jaskry z otwartym kątem przesączania: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Ophthalmology.* 2011;118:1989–1994.
283. Mitchell P, Hourihan F, Sandbach J, Wang JJ. Związek między jaskrą a krótkowzrocznością: badanie Blue Mountains Eye Study. *Okulistyka.* 1999;106:2010–2011.
284. Shen L, Melles RB, Metlapally R, et al. Związek między wadą refrakcji a jaskrą w populacji wieloetnicznej. *Ophthalmology.* 2016;123:92–101.
285. Chen SJ, Lu P, Zhang WF, Lu JH. Wysoka krótkowzroczność jako czynnik ryzyka pierwotnej jaskry z otwartym kątem przesączania. *Int J Ophthalmol.* 2012;7:70–73.
286. Brusini P, Salvat ML, Zeppieri M. Jak mierzyć ciśnienie wewnątrzgałkowe: aktualny przegląd różnych tonometrów. *J Clin Med.* 2021;10:3860.
287. Wang P, Song Y, Lin F, et al. Porównanie pomiarów tonometrii bezkontaktowej i tonometrii aplanacyjnej Goldmanna w niepatologicznej wysokiej krótkowzroczności. *Front Med (Lausanne).* 2022;9:819711.
288. De Moraes CGV, Prata TS, Liebmann J, Ritch R. Metody tonometrii i ich dokładność w odniesieniu do grubości rogówki i jej nieregularności. *J Optom.* 2008;1:43–49.
289. Jiang J, Song Y, Kong K, et al. Nieprawidłowości głowy nerwu wzrokowego w niepatologicznej wysokiej krótkowzroczności i ich związek z polem widzenia. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila).* 2023;12:460–467.
290. Lipstein EA, Brinkman WB, Britto MT. Co wiadomo na temat decyzji rodziców dotyczących leczenia? Narracyjny przegląd procesu podejmowania decyzji w pediatrii. *Med Decis Making.* 2012;32:246–258.
291. Vega-Diaz M, Gonzalez-Garcia H, de Labra C. Wpływ zaangażowania rodziców i stylów rodzicielskich na aktywny tryb życia dzieci: przegląd systematyczny. *PeerJ.* 2023;11: e16668.
292. McCrann S, Flitcroft I, Lalor K, Butler J, Bush A, Loughman J. Postawy rodziców wobec krótkowzroczności: kluczowy czynnik zmian w kontroli krótkowzroczności? *Ophthalmic Physiol Opt.* 2018;38:298–308.
293. Jiang Y, Zhu Z, Tan X, et al. Skuteczność powtarzanej terapii światłem czerwonym o niskiej intensywności w kontroli krótkowzroczności u dzieci: wielośrodkowe randomizowane badanie kontrolowane „”. *Okulistyka.* 2022;129:09–19.
294. Liu H, Yang Y, Guo J, Peng J, Zhao P. Uszkodzenie siatkówki po wielokrotnej ekspozycji na laserowe światło czerwone o niskim natężeniu. *JAMA Ophthalmol.* 2023;141:693–697.
295. Ying ZQ, Li DL, Zheng XY, Zhang XF, Pan CW. Czynniki ryzyka krótkowzroczności u dzieci i młodzieży: przegląd opublikowanych metaanaliz i przeglądów systematycznych. *Br J Ophthalmol.* 2024;108:167–174.
296. Grzybowski A, Singhanetr P, Nanegrungsunk O, Ruamvi-boonsuk P. Sztuczna inteligencja w badaniach przesiewowych w kierunku retinopatii cukrzycowej z wykorzystaniem kolorowych zdjęć siatkówki: od opracowania
- rozwoju do wdrożenia. *Ophthalmol Ther.* 2023;12:1419–1437.
297. Koseoglu ND, Grzybowski A, Liu TYA. Zastosowania głębokiego uczenia się w klasyfikacji i wykrywaniu zwyrodnienia plamki żółtej związanego z wiekiem na obrazach tomografii optycznej koherencyjnej: przegląd. *Ophthalmol Ther.* 2023;12:2347–23/9.
298. Chen Z, Wollstein G, Schuman JS, Ishikawa H. Sztuczna inteligencja a jaskra. W: Grzybowski A, red. *Sztuczna inteligencja w okulistyce*. Berlin: Springer International Publishing; 2021:113–121.
299. Li Y, Yip MYT, Ting DSW, Ang M. Sztuczna inteligencja i rozwiązania cyfrowe w leczeniu krótkowzroczności. *Taiwan J Ophthalmol.* 2023;13:142–1/0.
300. Yang X, Chen G, Qian Y, et al. Prognozowanie krótkowzroczności u nastolatków za pomocą metod uczenia maszynowego. *Int J Envi-ron Res Public Health.* 2020;17:463.
301. Tang T, Yu Z, Xu Q, et al. Algorytm oparty na uczeniu maszynowym stosowany do szacowania fizjologicznego wydłużenia osiowego gałki ocznej u dzieci z krótkowzrocznością. *Eye Vis (Lond).* 2020;7:0.
302. Wang Y, Du R, Xie S, et al. Modele uczenia maszynowego do przewidywania długoterminowej ostrości wzroku w przypadku oczu z wysoką krótkowzrocznością. *JAMA Ophthalmol.* 2023;141:1117–1124.
303. Chang L, Pan CW, Ohno-Matsui K, et al. Zmiany dna oka związane z krótkowzrocznością u dorosłych z wysoką krótkowzrocznością w Singapurze. *Am J Ophthalmol.* 2013;149:991–999.
304. Shao L, Zhang QL, Long TF, et al. Ilościowa ocena gęstości mozaiki dna oka i czynników z nią związanych na obrazach dna oka przy użyciu sztucznej inteligencji. *Transl Vis Sci Technol.* 2021;10(9):23.
305. Sun D, Du Y, Chen Q, et al. Cechy obrazowania za pomocą uczenia maszynowego do kwantyfikacji zmian tarczy nerwu wzrokowego i wpływu na grubość naczyńwłók u młodych pacjentów z krótkowzrocznością. *Front Med (Lausanne).* 2021;8:67/66.
306. Zhang Y, Li Y, Liu J, et al. Skuteczność sztucznej inteligencji w wykrywaniu patologicznej krótkowzroczności: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Eye (Londyn).* 2023;37:3/6–3/73.
307. Du R, Xie S, Fang Y, et al. Podejście oparte na głębokim uczeniu się do automatycznego wykrywania makulopatii krótkowzrocznej i patologicznej krótkowzroczności na obrazach dna oka. *Ophthalmol Retina.* 2021;1:123–1244.
308. Li Y, Feng W, Zhao X, 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;106:633–639.
309. Lu L, Ren P, Tang X, et al. Model AI do identyfikacji patologicznej krótkowzroczności oparty na algorytmach głębokiego uczenia się do klasyfikacji makulopatii krótkowzrocznej i wykrywania zmian „plus” w obrazach dna oka. *Front Cell Dev Biol.* 2021;9:719262.
310. Park SJ, Ko T, Park CK, Kim YC, Choi IY. Model głębokiego uczenia oparty na obrazach tomografii optycznej koherencyjnej 3D do automatycznego wykrywania patologicznej krótkowzroczności. *Diagnostics (Basel).* 2022;12:742.
311. Sogawa T, Tabuchi H, Nagasato D, et al. Dokładność głębokiej konwolucyjnej sieci neuronowej w wykrywaniu krótkowzrocznych chorób plamki żółtej przy użyciu tomografii optycznej koherencyjnej ze źródłem przemiatanym. *PLoS One.* 2020;15(4):e0227240.
312. Tan M, Le Q. Efficientnet: nowe podejście do skalowania modeli dla konwolucyjnych sieci neuronowych. *PMLR;* 2019:610–6114.
313. Tan TE, Anees A, Chen C, et al. Algorytmy głębokiego uczenia się oparte na zdjęciach siatkówki w diagnostyce krótkowzroczności oraz platforma blockchain ułatwiająca badania medyczne z wykorzystaniem sztucznej inteligencji: retrospektywne badanie wielokohortowe. *Lancet Digit Health.* 2021;3(3):e317–e329.
314. Ye X, Wang J, Chen Y, et al. Automatyczne badanie przesiewowe i identyfikacja makulopatii krótkowzrocznej na obrazach tomografii optycznej koherencyjnej przy użyciu głębokiego uczenia się. *Transl Vis Sci Technol.* 2021;10(13):10.

- 31/. Fang Z, Xu Z, He X, Han W. System identyfikacji patologicznej krótkowzroczności oparty na sztucznej inteligencji w programie szkolenia rezydentów okulistyki. *Front Cell Dev Biol.* 2022;10:10/3079.
316. Cahyo DAY, Wong DWK, Yow AP, Saw SM, Schmetterer L. Segmentacja objętościowa naczyńki przy użyciu sekwencyjnego podejścia głębokiego uczenia się u osób z wysoką krótkowzrocznością. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2020;2020:1286–1289.
317. Fan Y, Yu Z, Peng Z, et al. Strategia oparta na uczeniu maszynowym przewyższa tradycyjną metodę doboru parametrów soczewek do pierwszej próby terapii refrakcyjnej rogówki u chińskich nastolatków z krótkowzrocznością. *Cont Lens Anterior Eye.* 2021;44(3):101330.
318. Zhai J, Hou L, Yao Y, et al. Wpływ ortokorekcji nocnej i miękkich soczewek kontaktowych na gruczoł Meiboma oceniony za pomocą systemu analitycznego opartego na sztucznej inteligencji systemu analitycznego sztucznej inteligencji. *Cont Lens Anterior Eye.* 2023;46(3): 101841.
319. Wu TE, Chen HA, Jhou MJ, Chen YN, Chang TJ, Lu CJ. Ocena wpływu stosowania miejscowej atropiny w kontroli krótkowzroczności na ciśnienie wewnątrzgałkowe przy użyciu uczenia maszynowego. *J Clin Med.* 2020;10:111.
320. Funer F. Iluzja pewności: jak nieinterpretowalne wyniki uczenia maszynowego podważają autorytet epistemiczny lekarzy. Podejście deliberatywno-relacyjne. *Med Health Care Philos.* 2022;2/:167–178.
321. Chen JS, Coyner AS, Ostmo S, et al. Głębokie uczenie się w diagnostyce stadium retinopatii wcześniaków: dokładność i możliwość uogólnienia w różnych populacjach i przy użyciu różnych aparatów fotograficznych. *Ophthalmol Retina.* 2021/:1027–103/.
322. Floridi L, Cows J, King TC, Taddeo M. Jak projektować sztuczną inteligencję dla dobra społecznego: siedem podstawowych czynników. *Sci Eng Ethics.* 2020;26:1771–1796.