

# Optyka soczewek okularowych przeznaczonych do leczenia postępującej krótkowzroczności

David A. Atchison, dr, dr hab., I\* i W. Neil Charman, dr, dr hab.2

**ZNACZENIE:** Niniejszy artykuł stanowi przegląd optyki różnych soczewek okularowych stosowanych w kontroli krótkowzroczności w ciągu ostatnich 60 lat, ze szczególnym uwzględnieniem ostatnich 15 lat.

Krótkowzroczność stała się coraz większym problemem zdrowotnym na całym świecie, szczególnie w niektórych krajach Azji Wschodniej. Doprowadziło to do wielu prób spowolnienia jej postępu u dzieci i zmniejszenia jej wartości końcowej. Niniejszy przegląd dotyczy optyki soczewek okularowych stosowanych w kontroli krótkowzroczności, od soczewek dwuogniskowych po soczewki wielosegmentowe i soczewki z optyką dyfuzyjną. Metody leczenia opierają się na teoriach dotyczących powstawania lub postępu krótkowzroczności. Obejmują one hipotezy, że wzrost oka i krótkowzroczność u podatnych dzieci mogą być stymulowane przez (1) słabą reakcję akomodacyjną i wynikające z tego nadwzroczność przy wykonywaniu zadań wymagających widzenia z bliska, (2) względną nadwzroczność refrakcji obwodowej oraz (3) wysoki kontrast obrazu siatkówkowego, jaki występuje w środowisku miejskim. Stosowanie soczewek okularowych w celu spowolnienia postępu krótkowzroczności ma około 60-letnią historię. Przegląd został przedstawiony w przybliżeniu w kolejności, w jakiej wprowadzono różne rodzaje soczewek: dwuogniskowe, konwencjonalne soczewki progresywne, soczewki jednoogniskowe z niedokorygowaniem, specjalistyczne soczewki progresywne, soczewki wielosegmentowe z wbudowanym defokusem, soczewki dyfuzyjne i soczewki dwuogniskowe koncentryczne. W przeglądzie niektóre soczewki są połączone z modelem oka w celu określenia wad refrakcji dla widzenia peryferyjnego dla oka nieruchomego i dla widzenia fovealnego dla oka obracającego się. Podano dane liczbowe dotyczące skuteczności poszczególnych konstrukcji w spowalnianiu postępu krótkowzroczności, ale nie jest to artykuł epidemiologiczny i nie ma krytycznego przeglądu wyników. Niektóre z najnowszych metod leczenia, takie jak soczewki wielosegmentowe, wydają się zmniejszać wzrost oka i postęp krótkowzroczności o ponad 50% w okresie do 2 lat.

(*Optom Vis Sci* 2024;101:238–249)

**M** Krótkowzroczność stała się coraz większym problemem zdrowotnym na całym świecie, szczególnie w niektórych krajach Azji Wschodniej. Doprowadziło to do wielu prób spowolnienia jej postępu u dzieci. Wiele z tych prób obejmowało interwencje optyczne, w tym terapię światłem niebieskim i czerwonym, więcej czasu spędzanego na świeżym powietrzu (zwiększone oświetlenie), ortokeratologię (

nocne spłaszczenie centralnej części rogówki, aby uniknąć konieczności stosowania korekcji optycznej w ciągu dnia), soczewki okularowe i soczewki kontaktowe. Teoretyczne uzasadnienie dwóch ostatnich metod obejmuje (1) fakt, że dzieci, u których rozwija się krótkowzroczność lub które już są krótkowzroczne, mają słabą zdolność akomodacji<sup>1</sup>, co powoduje nadwzroczność podczas wykonywania zadań wymagających widzenia z bliska, stymulując wzrost oka<sup>2</sup>, oraz (2) fakt, że względna nadwzroczność obwodowa jest przyczyną wzrostu oka. Druga z tych teorii stanowi podstawę wielu dostępnych metod leczenia i jest poparta badaniami na zwierzętach.<sup>3</sup> Podstawy tej teorii są jednak wątpliwe<sup>4,5</sup>, a istnieją dowody kliniczne wskazujące, że względna nadwzroczność obwodowa jest wyłącznie konsekwencją rozwoju krótkowzroczności, a nie odwrotnie<sup>6–8</sup>. Niemniej jednak korekcja względnej nadwzroczności obwodowej może nadal przynosić korzyści, a najnowsze soczewki zaprojektowane zgodnie z tą teorią wykazały kliniczne korzyści w spowalnianiu postępu krótkowzroczności<sup>9</sup>.

Trzecia teoria głosi, że napięcie mechaniczne spowodowane przez soczewkę oka lub ciało rzęskowe ogranicza ekspansję równikową oka i powoduje wydłużenie osiowe, a pewne czynniki przyspieszają ten proces w przypadku oczu zagrożonych.<sup>10,11</sup> Zgodnie z tą teorią słaba reakcja akomodacyjna (teoria 1) i względna refrakcja nadwzroczna w refrakcji obwodowej (teoria 2) są jedynie konsekwencjami rozwoju krótkowzroczności. Teoria ta nie wydaje się wskazywać na rolę leczenia optycznego.

Czwarta, najnowsza teoria jest związana z odkryciem, że defekty fotoreceptorów w przypadku wysokiej krótkowzroczności powodują, że sąsiednie fotoreceptory dostarczają sygnały o wysokim kontraście;<sup>12</sup> w związku z tym wysoki kontrast występujący w środowisku miejskim może stymulować wydłużenie osiowe prowadzące do krótkowzroczności.<sup>13,14</sup> Leczenie polega na stosowaniu soczewek okularowych z wieloma małymi obszarami rozpraszającymi umieszczonymi na obwodowej powierzchni przedniej. Powodują one zmniejszenie kontrastu obrazu na obwodowej części siatkówki.<sup>15</sup> Należy jednak zauważyć, że w tym obszarze kontrast obrazu jest już znacznie zmniejszony z powodu znacznych aberracji drugiego i wyższego rzędu oka. Leczenie soczewkami zazwyczaj polega na zastosowaniu dodatkowej mocy dodatniej (lub alternatywnie mniejszej mocy ujemnej) w centralnym polu widzenia w przypadku pierwszej z wyżej wymienionych teorii oraz w części obwodowego pola widzenia w przypadku drugiej teorii. Pod tym względem optyka soczewek okularowych i soczewek kontaktowych różni się zasadniczo, ponieważ (1) soczewki okularowe są umieszczone w odległości około 12 mm od oka, podczas gdy soczewki kontaktowe są umieszczane na rogówce; (2) soczewki okularowe nie poruszają się wraz z okiem, podczas gdy soczewki kontaktowe tak; oraz (3) soczewki okularowe są znacznie mniej zakrzywione niż soczewki kontaktowe. W przypadku soczewki okularowej tylko niewielka część jej powierzchni odwzorowuje daną część pola widzenia w danym momencie, dlatego różne części soczewki mogą być wykorzystywane do różnych zadań. Natomiast w przypadku soczewki kontaktowej duża część jej powierzchni odwzorowuje daną część pola widzenia. Powoduje to różne zestawy

wyzwań związanych z projektowaniem tych dwóch metod.

Niniejszy przegląd dotyczy optyki soczewek okularowych stosowanych w kontroli krótkowzroczności. Został on opracowany w przybliżonej kolejności czasowej, w jakiej wprowadzono różne rodzaje soczewek. W miarę możliwości podano dane liczbowe dotyczące skuteczności w spowalnianiu postępu krótkowzroczności, zgłoszone w badaniach dotyczących konkretnych konstrukcji soczewek. Nie jest to jednak artykuł epidemiologiczny i nie zawiera on krytycznego przeglądu wyników badań. W przypadku niektórych soczewek, o których dostępnych jest wiele informacji,

Przedstawiono wyniki ray tracingu pokazujące korekty pozaosiowe dla mocy 4D soczewek-. Przednie powierzchnie soczewek Hoya MiyoSmart (Hoya Corp., Tokio, Japonia) i Essilor Stelless (Essilor, Charenton-le-Pont,

<sup>1</sup> Centrum Badań nad Wzrokiem i Okiem, Uniwersytet Techniczny Queensland, Kelvin Grove, Queensland, Australia <sup>2</sup> Wydział Farmacji i Optometrii, Wydział Biologii, Medycyny i Zdrowia, Uniwersytet w Manchesterze, Manchester, Wielka Brytania \*d.atchison@qut.edu.au

Zgłoszono: 24 marca 2024 r.

Przyjęto: 18 kwietnia 2024 r.

Finansowanie/wsparcie: Żaden z autorów nie zgłosił finansowania/wsparcia.

Ujawnienie konfliktu interesów: Żaden z autorów nie zgłosił finansowego konfliktu interesów.

Wkład autorów i podziękowania: Koncepcja: DAA, WNC; Badania: DAA; Metodologia: DAA; Zasoby: DAA, WNC; Pisanie – pierwotny projekt: DAA, WNC.

Matt Jaskulski dostarczył informacji na temat optyki soczewek wielosegmentowych. Firma Nova Technologies dostarczyła dane dotyczące projektu powierzchni soczewki MYOFIX. Autorzy dziękują projektantom optycznym Ansys Zemax, Csilli Timar-Fulep, Angelowi Moralesowi i Yuanowi Chenowi za porady dotyczące ray tracingu, a także Katrinie Schmid i Sauliusowi Varnasowi za uwagi dotyczące wersji roboczych manuskryptu.

Prawa autorskie© 2024 American Academy of Optometry ISSN: 1040-5488/24/10105-0238

TABELA 1. Soczewki okularowe do leczenia postępującej krótkowzroczności

| Grupy soczewek*                            | Badanie/źródła                                                                                | Nazwa, opis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Soczewki dwuogniskowe†                     | Grosvenor i in. <sup>29</sup>                                                                 | Styl E (Executive, E-Line, E-type) Segment górny 2 mm poniżej środka źrenicy<br>Dodatki +1,00 i +2,00 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                            | Fulk i in. <sup>30</sup>                                                                      | Segment płaski o średnicy 28 mm Górna krawędź segmentu 1 mm powyżej dolnej krawędzi rogówki<br>Dodatek +1,50 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                            | Cheng i in. <sup>26,27</sup>                                                                  | Typ E<br>2 typy — jeden z 3Δ BI w pobliżu pryzmatu każdej soczewki<br>Górna część segmentu 2 mm powyżej dolnej krawędzi rogówki<br>Dodatek +1,50 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                            | Leung i <sup>Brown</sup> 31                                                                   | Essilor NZ2<br>Dopasowanie 1 mm powyżej środka źrenicy<br>Dodatki +1,5 i +2,00 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Konwencjonalne soczewki progresywne (moc)† | Edwards i in. <sup>32</sup>                                                                   | Sola MC (krótki korytarz)<br>Dopasowanie w poprzek środka źrenicy<br>Dodatek +1,50 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                            | Gwiazda i in. <sup>33,34</sup>                                                                | Essilor Varilux Comfort<br>Dopasowanie krzyża 4 mm powyżej środka źrenicy<br>Dodatek +2,00 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                            | Hasebe i in. <sup>35</sup>                                                                    | Sola MC (krótki korytarz)<br>Dopasowanie krzyża na środku źrenicy<br>Dodatek +1,50 D<br>Ponieważ soczewki czasami się przesuwały w badaniu Hasebe i wsp., w niektórych przypadkach umieszczano je 3 mm powyżej środka źrenicy podczas wizyty po 6 miesiącach lub gdy przepisywano nowe soczewki                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                            | Yang i in. <sup>36</sup>                                                                      | Sola MC (krótki korytarz)<br>Dodatek +1,50 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                            | Berntsen i in. <sup>37,38</sup>                                                               | Essilor Varilux Ellipse (krótki korytarz)<br>„Dopasowane co najmniej 2 mm wyżej niż normalnie”<br>Dodatek +2,00 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                            | Chung i in. <sup>39</sup><br>Adler i <sup>Millodo</sup> 40                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Soczewki jednoogniskowe — niedokorygowanie | Kanda i in. <sup>41</sup><br>Zeiss Vision <sup>Care42</sup> Zeiss<br>Vision <sup>Care43</sup> | Zeiss MyoKids przeznaczone do leczenia krótkowzroczności. Szybka zmiana mocy poza strefą pośrednią i strefą bliską, dzięki czemu sygnały akomodacyjne z obrzeża mogą stymulować akomodację w większym stopniu niż w przypadku tradycyjnych konstrukcji.<br>Zeiss MyoVision/Pro i MyoVision Ace przeznaczone do leczenia rozmycia widzenia obwodowego, posiadające centralną strefę dalekiego widzenia otoczoną strefą funkcjonalną o dodatkowej dodatniej mocy — strefa funkcjonalna jest większa w modelu „Ace” niż w modelu „Pro” |
|                                            | Yeo i in. <sup>20</sup>                                                                       | Essilor Myopilux Lite i Myopilux Plus są podobne do tradycyjnych soczewek progresywnych.<br>Essilor Max to soczewka typu E-Style z dodatkiem +2,00 D i pryzmatem 3 D base-in dla widzenia z bliska dla każdej soczewki.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                            | Tarutta i in. <sup>44,45</sup>                                                                | Artoptica Perifocal<br>Pozioame strefy dodatku z dodatkiem do 2,5 D w okolicy nosowej i 3,0 D w okolicy skroniowej.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                            | Li i in. <sup>46</sup>                                                                        | Okulary Apollo<br>Strefa progresywna ma moc +2,50 D w górnej części, +2,00 D w części nosowej i +1,50 D po stronie skroniowej<br>Rodenstock MyCon Pozioame strefy dodatku                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                            | Yuval i in. <sup>23</sup>                                                                     | Shamir Optimee (Shamir Myopia Control)<br>Przezroczysta strefa daleka w kształcie litery U, rozciągająca się głównie w górę, otoczona dodatkiem peryferyjnym                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Wiele segmentów                            | Lam i in. <sup>47,48</sup> Zhang i in. <sup>49,50</sup> Chun i in. <sup>51</sup>              | Hoya MiyoSmart<br>Wykorzystuje technologię „defocus incorporated multi segment” (DIMS) Centralna strefa o średnicy 9 mm otoczona soczewkami rozmieszczonymi w 9 sześciokątach<br>Średnica soczewki 1,0 mm, dodatek +4,0 D                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Ciąg dalszy na następnej stronie

TABELA 1. (Ciąg dalszy)

| Grupy soczewek*                     | Badania/referencje                                                                        | Nazwa, opis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DOT                                 | Bao i in. <sup>52,53</sup> Gao i in. <sup>54,55</sup> Huang i in. <sup>56</sup>           | Essilor centralnej wynosząca 9 mm otoczona soczewkami ułożonymi w 11 pierścieniach, przy czym sąsiednie soczewki stykają się ze sobą Średnica soczewki 1,1 mm, dodatek w środku różni się w zależności od pierścienia (5,8–3,5 D)                                                                                               |
|                                     | Carl Zeiss <sup>42</sup> Liu i in. <sup>57</sup>                                          | Zeiss MyoCare i MyoCare S Dodatkowa moc rozmieszczona w 15 cylindrycznych pierścieniach o średnicy 0,5 mm każdy MyoCare — dzieci poniżej 10 roku życia, centralna strefa odległości 7 mm i średnia dodatkowa moc (połowa dodatkowej mocy cylindrycznej) 4,6 D MyoCare S — starsze dzieci, strefa centralna 9 mm, dodatek +3,8 D |
|                                     | Rappon i in. <sup>15</sup>                                                                | SightGlass Vision OT Przejrzysta strefa odległości o średnicy 5 mm Dyfuzory lub rozpraszacze są przymocowane do soczewki „o średnicy około 0,14 mm i wysokości około 0,2 mm, z nieregularną krzywizną promieniową, która jest bardziej stroma po bokach i spłaszczona na górze”. Odstęp między dyfuzorami wynosi około 0,3 mm.  |
|                                     | Internacional Optica <sup>58</sup> Szeps i in. <sup>59</sup> de Tomas i in. <sup>60</sup> | International Optics — Diffusion Optics Multiple Optics (DOMS) Centralna strefa o średnicy 9 mm otoczona punktami rozpraszającymi o średnicy 1,0 mm, odstęp 0,75 mm Kropki rozciągają się do średnicy 36 mm                                                                                                                     |
| Soczewki dwuogniskowe koncentryczne | de Tomas i in. <sup>24</sup> Iribarren i in. <sup>61</sup>                                | Novar Technologies MYOFIX Centralna strefa o odległości 9 mm, krótka strefa przejściowa i około +3,50 D dodane do pozostałej części soczewki                                                                                                                                                                                    |
| Inne soczewki                       | Hasebe i in. <sup>62</sup> asferyczności Varnas i in. <sup>63</sup>                       | Badanie soczewek progresywnych o wysokim dodatnim współczynniku Patent opisujący połączenie soczewki progresywnej i soczewki soczewki DIMS                                                                                                                                                                                      |
|                                     | Atchison i in. <sup>64</sup>                                                              | Projekt i produkcja soczewek jednoogniskowych do korekcji refrakcji obwodowej refrakcji wzdłuż południka poziomego                                                                                                                                                                                                              |

\*We wszystkich wymienionych badaniach, w których miało to znaczenie, istniała grupa kontrolna z soczewkami jednoogniskowymi. †Podano tylko kilka z wielu badań. Kompleksowe omówienie badań przeprowadzonych do 2010 r. można znaleźć w publikacji Cheng i in.<sup>28</sup>. DIMS= soczewki wielosegmentowe z wbudowanym defokusem; DOT= technologia optyki dyfuzyjnej.

Francja) zostały zamodelowane przy użyciu typu powierzchni pierścienia macierzy, który stanowi część programu do śledzenia promieniowania Ansys Zemax OpticsStudio (Ansys, Canonsburg, PA). Powierzchnia tylna typu dwuogniskowego Novar Technologies MYOFIX (Novar Technologies, Miami Beach, FL) została zamodelowana jako powierzchnia siatkowa w tym samym programie. Chociaż optykę dla oka obracającego się i widzenia fovealnego można w dużej mierze zamodelować bez uwzględniania oka, nie jest to szczególnie przydatne w przypadku oka nieruchomego w widzeniu peryferyjnym. W związku z tym każda soczewka została połączona z modelowym okiem Atchisona, którego parametry odpowiadają krótkowzroczności 4 D.<sup>16</sup> Soczewka znajdowała się 12 mm od przedniej rogówki, a środek obrotu oka został umieszczony 27 mm od tylnego wierzchołka soczewki. Dalsze szczegóły dotyczące procedur zostaną przedstawione w innych artykułach.

### okulary dwuogniskowe

Okulary dwuogniskowe są stosowane w leczeniu postępującej krótkowzroczności od ponad 60 lat (patrz np. Mandell<sup>17</sup>). Ich zadaniem jest zmniejszenie zapotrzebowania na akomodację podczas pracy z bliska, a tym samym zmniejszenie związanego z tym opóźnienia akomodacji, które w przeciwnym razie mogłoby stymulować rozwój krótkowzroczności. Głównymi typami stosowanymi w tej pracy były okulary dwuogniskowe typu E (E-line, E-type, Executive) oraz okulary dwuogniskowe typu flat top (wcześniej znane jako okulary dwuogniskowe „D-seg”). Okulary dwuogniskowe typu E można uznać za posiadające dwie soczewki, część do widzenia na odległość i część do widzenia z bliska (segment) (rys. 1A). Środek optyczny dla widzenia z bliska znajduje się na linii podziału, co oznacza, że nie ma nagłej zmiany pryzmatu, gdy kierunek widzenia zmienia się z powyżej na poniżej linii podziału (warunek braku skoku obrazu). Większość okularów dwuogniskowych typu E ma segment z przodu, chociaż Rodenstock

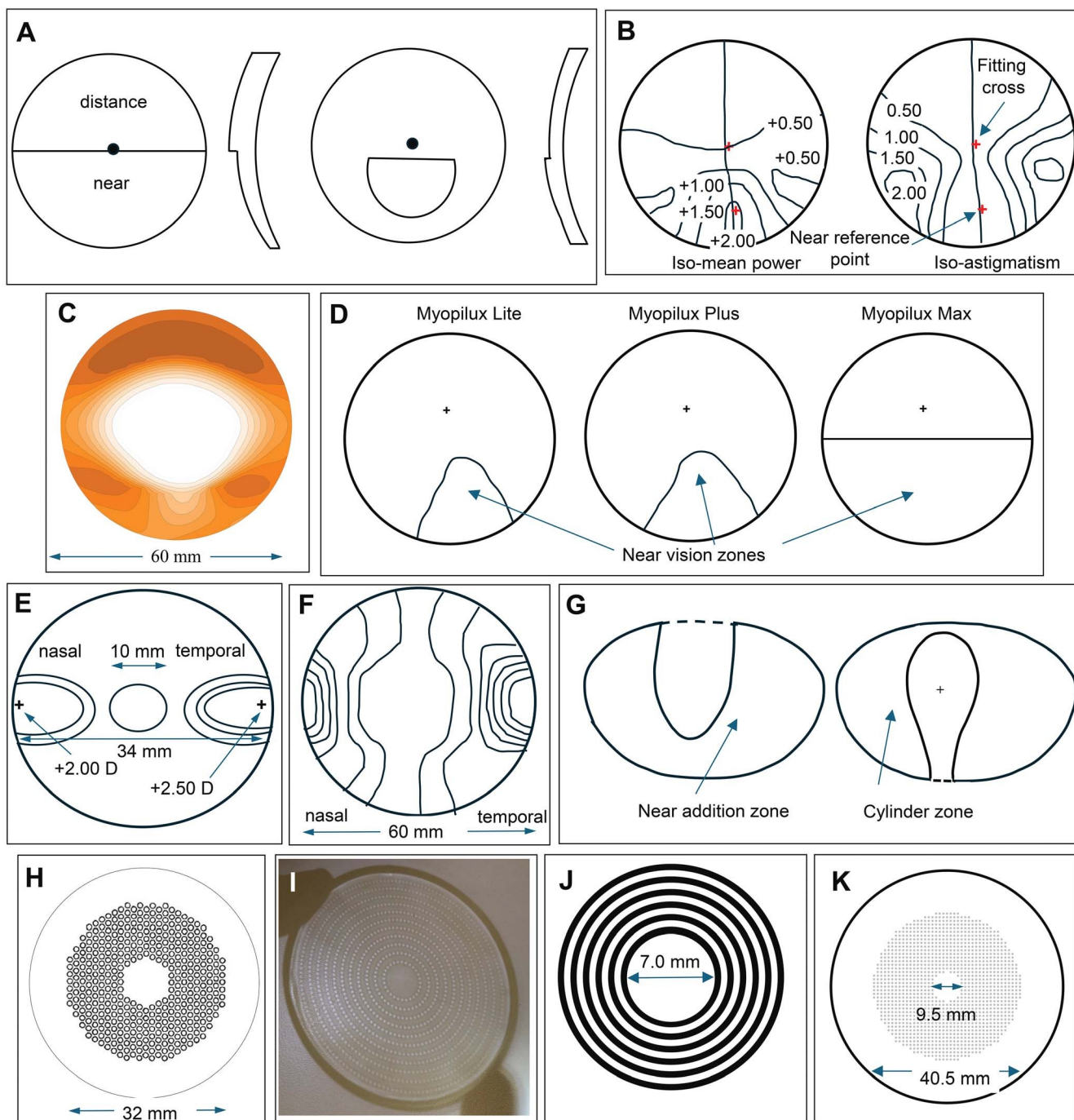
(Monachium, Niemcy) wyprodukowało wersję szklaną z segmentem z tyłu w połowie XX wieku.<sup>18</sup> Dodatkową moc można opisać jako zapewniającą pryzmat bazowy w częściach bliższych. W niektórych badaniach zastosowano pryzmat z podstawą skierowaną do wewnątrz w części soczewki przeznaczonej do widzenia z bliska.<sup>26,27</sup> Soczewki dwuogniskowe typu flat top mają kształt litery „D” obróconej na bok (rys. 1A). Wytwarzają one niewielki lub żaden pryzmat z podstawą skierowaną w dół na granicy segmentów, co odpowiada niewielkiemu lub zerowemu skokowi obrazu. Ogólnie rzecz biorąc, soczewki te wywierają mniejszy wpływ na pole peryferyjne niż ich odpowiedniki typu E.

Zwykle górna część segmentu znajduje się w górnej części dolnej powieki, ale w badaniach nad krótkowzrocznością segmenty często umieszcza się wyżej, aby zapewnić wykonywanie zadań wymagających widzenia z bliska za pomocą segmentu. Stosowane dodatki to +1,0, +1,5 i +2,0 D.

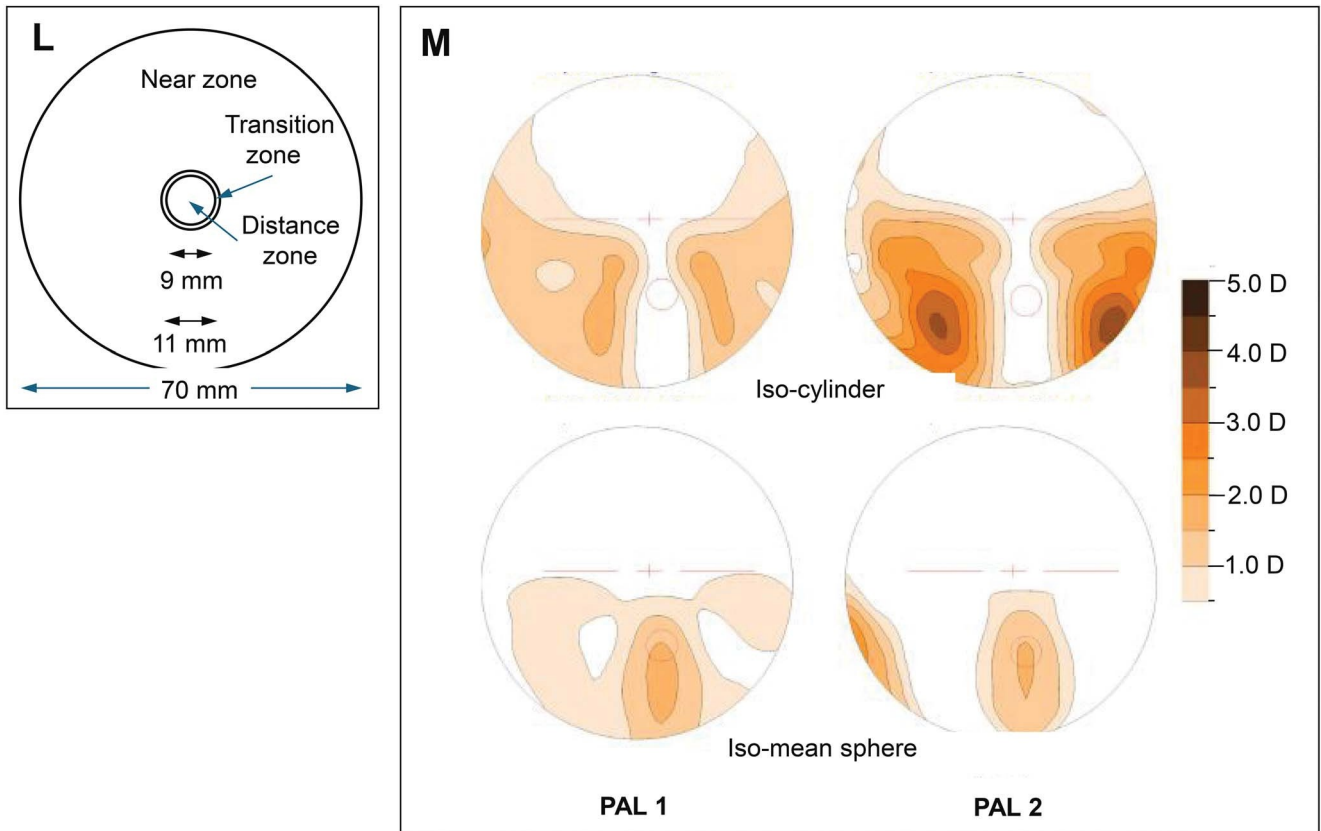
Wyniki badań klinicznych sugerują, że okulary dwuogniskowe mają co najwyżej niewielki wpływ na postęp krótkowzroczności w porównaniu z okularami jednoogniskowymi, przy czym największy sukces odnotowano u dzieci z większym opóźnieniem akomodacyjnym (patrz przegląd autorstwa Cheng i in.<sup>28</sup>). Kontrowersyjną kwestią jest to, czy okulary dwuogniskowe przynoszą korzyści w przypadku egzophorii w bliżu. Niektóre badania wymieniono w tabeli 1.<sup>26,27,29,30</sup>

### KONWENCJONALNE SOCZEWKI PROGRESYWNE (MOC)

Przez „konwencjonalne” rozumiemy soczewki progresywne (mocne), pierwotnie przeznaczone do korekcji przebiopii. Aby zrekomensować utratę akomodacji związaną z wiekiem, soczewki progresywne zostały zaprojektowane tak, aby zapewnić ciągłe widzenie w dużym zakresie odległości, a nie tylko w ustalonych, stałych odległościach.



**RYСУNEK 1.** Soczewki stosowane do kontroli krótkowzroczności. Części są w różnych skalach. (A) Soczewki dwuogniskowe — (po lewej) soczewki dwuogniskowe Executive, po prawej (płaskie u góry) (na podstawie Jalie, str. 164<sup>18</sup>). (B) Konwencjonalne soczewki progresywne, pokazujące wykresy izocyndryczne i izomedyczne (na podstawie Jalie, str. 471<sup>18</sup>). (C) Soczewka Carl Zeiss MyoPro pokazująca wykresy mocy izomejnej dla widzenia peryferyjnego.<sup>19</sup> (D) Essilor Myopilux Lite, Myopilux Plus i Myopilux Max, pokazujące strefy dodatku do widzenia z bliska (na podstawie Yeo<sup>20</sup>). (E) Soczewka Perifocal firmy ArtOptica, pokazująca strefy dodatku do blizy i cylindryczne (na podstawie Silva-Leite et al.<sup>(21)</sup>). (F) Soczewka MyCon firmy Rodenstock, pokazująca wykresy mocy izocyndrycznej (na podstawie Rodenstock<sup>(22)</sup>). (G) Soczewka Optimee firmy Shamir, pokazująca strefy dodatku do blizy i cylindryczne (na podstawie Yuval et al.<sup>23</sup>). (H) Soczewka MiyoSmart firmy Hoya, pokazująca rozmieszczenie soczewek na przedniej powierzchni. (I) Soczewka Stelless firmy Essilor, pokazująca projekcję soczewek na tle. (J) Carl Zeiss MyoCare, pokazujący wygląd od przodu z sześcioma wewnętrznymi pierścieniami o średnicy około 30 „cylindrycznych”. (K) Soczewka DOMS firmy Internationale Óptica, widok z przodu (na podstawie de Tomas et al.<sup>24</sup>). (Ciąg dalszy)



RYSUNEK 1. (Ciąg dalszy) (L) MyoFix firmy Novar Technologies (na podstawie de Tomas et al.<sup>24</sup>). (M) Dwie eksperymentalne soczewki progresywne, pokazujące wykresy mocy izocylintrycznej i izomejnej (obracające się oko) (na podstawie Varnas et al.<sup>25</sup>).

przez soczewki dwu- i trójogniskowe. Są one dostępne od końca lat 50. XX wieku<sup>18</sup>. Można je opisać jako posiadające cztery strefy: strefę daleką obejmującą około połowy soczewki (przynajmniej w postaci nieprzyciętej), strefę progresywną (korytarz pośredni) łączącą strefę daleką i bliską, strefę bliską poniżej strefy progresywnej oraz strefę peryferyjną, do której kierowane są nieuniknione aberracje. Na stronach internetowych producentów soczewek okularowych często przedstawiane są wykresy konturu izocylintrycznego, a czasami także wykresy konturu izosferycznego (rys. 1B). Większość z nich jest produkowana z myślą o widzeniu fovealnym przy obracającym się oku. Przez kilka dziesięcioleci progresywna moc znajdowała się na przedniej powierzchni, ale obecnie może znajdować się na tylnej powierzchni lub być połączona na obu powierzchniach. Wraz z udoskonaleniem projektowania i produkcji zmniejszyły się aberracje w strefach peryferyjnych i tempo ich zmian, chociaż ma na to wpływ korytarz, ponieważ niepożądane astygmatyzm jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do długości korytarza.<sup>18</sup> Krzyż dopasowania soczewki w górnej części korytarza pośredniego, widoczny przed usunięciem znaków atramentowych, jest zazwyczaj wyrównany z centrum źrenicy. W latach 90. wprowadzono soczewki progresywne do użytku zawodowego, przeznaczone głównie do widzenia pośredniego i bliskiego. Jalie opisał rozwój soczewek progresywnych do 2020 roku.<sup>18</sup>

Podobnie jak w przypadku okularów dwuogniskowych, soczewki są często montowane „wysoko”, aby zapewnić wykonywanie zadań wymagających widzenia z bliska w strefie widzenia bliskiego. Aby to ułatwić, w niektórych badaniach zastosowano soczewki z krótkimi korytarzami pośrednimi. Zastosowano dodatki +1,5 i +2,0 D.

Stwierdzono, że soczewki progresywne mają umiarkowane działanie hamujące postęp krótkowzroczności, wynoszące około 30% w porównaniu z soczewkami jednoogniskowymi w pierwszym roku noszenia.<sup>65</sup> Podobnie jak w przypadku okularów dwuogniskowych, największy sukces odnosi się w przypadku dzieci z większym opóźnieniem akomodacyjnym i/lub esophorią w bliskiej odległości.<sup>26</sup> Należy zauważyć, że chociaż góra „odległość”

Obszary okularów dwuogniskowych i progresywnych są podobne, jednak rozkład mocy w dolnej połowie obu konstrukcji i ich wpływ na obraz w dolnej części pola widzenia są bardzo różne. Kilka badań wymieniono w tabeli 1.<sup>31–38</sup>

## SOCZEWKI JEDNOOGNISKOWE — NIEWYSTARCZAJĄCA KOREKCJA

Korekcja okularowa spowoduje, że obraz obiektu znajdującego się blisko zostanie umieszczony za siatkówką, gdy akomodacja jest niewystarczająca, co sugeruje, że niedokładna korekcja krótkowzroczności może być pomocna w kompensowaniu tego opóźnienia w akomodacji, a tym samym hamować postęp choroby. W praktyce, w zamaskowanym, randomizowanym badaniu stwierdzono, że niedokorygowanie o 0,75 D dało nieoczekiwany średni wynik 0,23 D (30%) wzrostu progresji w ciągu 2 lat.<sup>39</sup> W innym badaniu z niedokorygowaniem o 0,50 D odnotowano wzrost progresji o 0,17 D (21%) w ciągu 18 miesięcy, ale nie było to znaczące.<sup>40</sup> Ponieważ niedokorygowanie jest równoważne dodatniej adycji w polu widzenia, sugeruje to, że dodatkowa dodatnia moc w polu centralnym lub peryferyjnym nie jest realną opcją terapeutyczną, ale możliwe jest, że w badaniach tych nie osiągnięto istotnego prognozy.

## Soczewki progresywne opracowane do leczenia krótkowzroczności

Od około 2010 roku wielu głównych producentów soczewek okularowych wytwarza soczewki progresywne przeznaczone specjalnie do leczenia krótkowzroczności. Układ soczewek różni się znacznie w zależności od producenta. Można przypuszczać, że mapy mocy soczewek wykonanych zgodnie z teorią rozogniskowania peryferyjnego pokazują mapy konturowe dla oka nieruchomego w widzeniu peryferyjnym, a nie dla oka obracającego się w widzeniu fovealnym. Oznacza to, że efektywna przysłona soczewki/oka

System znajduje się w źrenicy oka, a nie w środku obrotu oka. Opublikowano tylko kilka badań klinicznych dotyczących takich soczewek.

Carl Zeiss oferuje zestaw trzech soczewek o nazwach MyoKids, MyoVision/Pro i MyoVision Ace (Carl Zeiss, Oberkochen, Badenia-Wirtembergia, Niemcy).<sup>19,42,43</sup> Soczewki MyoKids są przeznaczone do korekcji opóźnienia akomodacji. Soczewka ta charakteryzuje się szybką zmianą mocy w odległości od strefy pośredniej i bliskiej, dzięki czemu sygnały akomodacyjne z obrzeża mogą stymulować akomodację w większym stopniu niż w przypadku tradycyjnych konstrukcji. Dwie soczewki MyoVision zapewniają widzenie centralne na odległość, otoczone obszarami o dodatkowej mocy, które służą do leczenia krótkowzroczności zgodnie z teorią rozogniskowania obwodowego. Rys. 1C przedstawia linie indeksu izo-rozmycia odpowiadające nieruchomemu oku dla soczewki MyoVision/Pro. Obszar wyraźnego widzenia na odległość jest mniejszy, a strefa „funkcjonalna” jest większa dla soczewki Ace niż dla soczewki Pro. Kanda i wsp.<sup>41</sup> przeprowadzili starannie zaplanowane badanie kliniczne soczewek „MyoVision”, ale nie stwierdzili istotnych różnic w postępie krótkowzroczności i wydłużeniu osiowym między grupą noszącą soczewki MyoVision a grupą kontrolną noszącą soczewki jednoogniskowe. Niedawne wprowadzenie na rynek zestawu soczewek Zeiss MyoCare (patrz poniżej) budzi wątpliwości, czy wcześniejsze soczewki będą nadal dostępne.

Essilor oferuje zestaw trzech soczewek o nazwach Myopilux Lite, Myopilux Plus i Myopilux Max.<sup>20</sup> Pierwsze dwie wydają się być podobne do tradycyjnych soczewek progresywnych, przy czym „Lite” ma dodatek +2,00 D, a „Plus” ma szerszą strefę widzenia z bliska niż „Lite” (rys. 1D). „Max” nie jest soczewką progresywną, a raczej soczewką dwuogniskową typu E-Style z dodatkiem +2,00 D i pryzmatem 3Δ w bazie w każdej soczewce. Sukces nowszej soczewki Essilor Stellest (patrz poniżej) może spowodować zaprzestanie produkcji wcześniejszych soczewek.

Soczewka perifokalna ArtOptica (Grand Rapids, MI) jest dostępna od 2011 roku. Progresywne dodawanie jest ograniczone do południka poziomego, z mocą do 2,5 i 3,0 D odpowiednio w obszarze nosowym i skroniowym (rys. 1E). Badania przeprowadzone wśród użytkowników wykazały wyniki podobne do tych dla soczewek wielosegmentowych z defokusem (DIMS)<sup>44,45</sup> (patrz następna sekcja), z danymi dostępnymi dla okresu od 4 do 5 lat od rozpoczęcia użytkowania.<sup>44</sup> Zgodnie z oczekiwaniami soczewka skutecznie zmniejsza względną nadwzroczność obwodową wzdłuż poziomego pola widzenia.<sup>21,66,67</sup>

Soczewka Apollo została wspomniana przez Li i wsp.<sup>46</sup> Pełna moc dodatnia wynosząca 2,50 D występuje w górnej części, przy czym 80% tej mocy osiąga się w części nosowej, a 60% w części skroniowej.

W 2023 r. firma Rodenstock wprowadziła na rynek soczewkę MyCon. Podobnie jak soczewka peryfokalna, ma ona na celu zapewnienie dodatkowej mocy dodatniej w poziomym polu widzenia (rys. 1F).<sup>22</sup>

Soczewka Optimee firmy Shamir (Górna Galilea, Izrael) również została ponownie wprowadzona na rynek w 2023 r. W artykule próbnym nazwano ją Shamir Myopia Control.<sup>23</sup> Istnieje wyraźna strefa w kształcie litery U otoczona dodatkową peryferią (rys. 1G). W artykule opisano 12-miesięczny postęp krótkowzroczności i długości osiowej u dzieci w wieku od 6 do 13 lat w grupie kontrolnej o średniej wartości 0,64 D i 0,32 mm oraz w grupie leczonej o średniej wartości

0,48 D (75% postępu kontroli) i 0,21 mm (65%). Należy zauważyć, że wiele artykułów odnosi się do efektów leczenia; w tym przypadku wynoszą one odpowiednio 0,64 –

0,48 = 0,16 D (100 – 75 = 25%) oraz 0,32 – 0,11 = 0,21 mm (100 – 65 = 35%).

Wszystkie te konstrukcje powodują wyraźne zniekształcenia obrazu. Jednak ograniczone dane opublikowane nie wskazują, aby użytkownicy odczuwali większy dyskomfort wzrokowy niż osoby korzystające z soczewek jednoogniskowych.<sup>23</sup> Wynik ten odzwierciedla wyniki uzyskane w przypadku osób z przeziopią korzystających z konwencjonalnych soczewek progresywnych, których świadomość zniekształceń jest zazwyczaj minimalna po okresie adaptacji.

## WIELOKROTNE SEGMENTY

Soczewki tego typu stały się coraz bardziej popularne w ostatnim dziesięcioleciu, a rozsądna kontrola postępu krótkowzroczności została

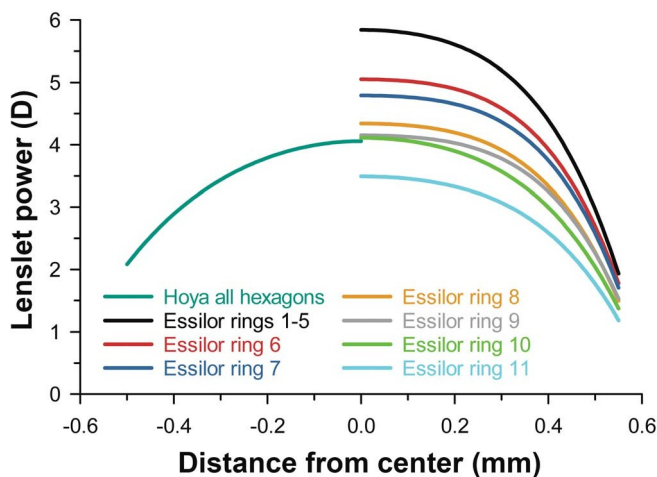
stwierdzono w badaniach klinicznych z wykorzystaniem kilku wariantów podstawowej konstrukcji. Soczewki zazwyczaj składają się z centralnego obszaru dalekiego o średnicy około 10 mm, otoczonego obszarem, w którym moc dalekiego widzenia jest uzupełniana przez układ małych soczewek o dodatknej mocy, które pokrywają około 50% powierzchni. Soczewka Hoya MiyoSmart ma soczewki ułożone w dziewięciu sześciokątach, a każda soczewka jest otoczona sześcioma soczewkami (rys. 1H). W soczewkach Essilor Stellest soczewki są ułożone w 11 pierścieniach (rys. 1I). Soczewki Zeiss MyoCare nie mają oddzielnych soczewek, ale mają około 30 pierścieni; można je uznać za podobne do soczewek Stellest, ale z sąsiednimi soczewkami w pierścieniu przesuniętymi o niewielkie odległości (rys. 1J).

Soczewki Hoya MiyoSmart są opisane jako wykorzystujące technologię DIMS. Do tej pory opublikowano 11 artykułów związanych z wynalazcami z Politechniki w Hongkongu i korporacji Hoya. W jednym z artykułów opisano 24-miesięczny postęp krótkowzroczności i długości osiowej u dzieci w wieku od 8 do 13 lat w grupie kontrolnej o średniej

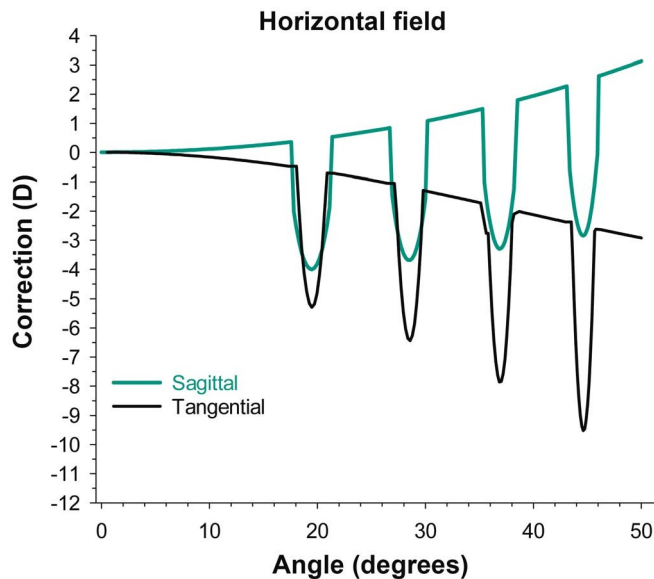
0,85 D i 0,55 mm, a w grupie badanej średnio 0,41 D (48% progresji w grupie kontrolnej) i 0,21 mm (38%).<sup>47</sup> Zakres funkcji wzrokowych był podobny w grupie kontrolnej i badanej.<sup>48</sup> Przeprowadzono badania dotyczące wywołanych zmian w względnej refrakcji obwodowej<sup>49,50</sup> i grubości naczyńwłók.<sup>51</sup>

Optyka soczewek Hoya MiyoSmart została zbadana w kilku badaniach<sup>68–70</sup>, z których dwa dotyczyły również soczewek Essilor Stellest<sup>69,70</sup>. Soczewki MiyoSmart są wykonane z poliwęglanu o krzywiznie podstawowej 3,0 D i indeksie 1,523. Środki soczewek w najbardziej wewnętrznym sześciokącie znajdują się w odległości od 5,2 do 6,0 mm od środka soczewki, a następny sześciokąt jest przesunięty o kolejne 1,3 mm na zewnątrz i tak dalej, aż do dziewiątego sześciokąta, który znajduje się w odległości od 15,6 do 18,0 mm od środka. Średnica soczewki wynosi około 1,0 mm. Gantes-Núñez i wsp.<sup>70</sup> ocenili soczewkę MiyoSmart za pomocą urządzenia Hartmann-Shack firmy Optcraft (Erlangen, Niemcy) przeznaczanego do pomiaru soczewek kontaktowych. Stwierdzili, że soczewki miały około 4,0 D mocy w środku z ujemną asferycznością i żadną z tych wartości nie ulegała zmianie w sześciokątach (rys. 2). Obliczono szereg funkcji, w tym nachylenie fali, moc strzałkową, moc styczną oraz pochodne wielkości rozkładu światła, funkcję transferu modulacji i obrazy siatkówkowe optotypów litery E.

Rys. 3 przedstawia korekty mocy strzałkowej i stycznej wymagane dla połączenia soczewki MiyoSmart 4 D firmy – i i odpowiedniego modelu oka wzdłuż poziomego pola widzenia. Należy zauważyć, że



RYSUNEK 2. Moc soczewki jako funkcja odległości od środka soczewki. Soczewki Hoya pokazano po lewej stronie, a soczewki Essilor po prawej stronie. Dopasowania uzyskane na podstawie śledzenia promieni oparto na danych dotyczących aberracji falowej dostarczonych przez Matta Jaskulskiego.



RYSUNEK 3. Korekty mocy strzałkowej i stycznej soczewki Hoya MiyoSmart o mocy -4 D w połączeniu z modelowym okiem wzdłuż poziomego pola widzenia. Artefakty na krawędzi soczewek, spowodowane ograniczeniami próbkowania, zostały usunięte.

Na osi część soczewki odpowiedzialna za odległość (lub nośnik) w pełni kompensuje krótkowzroczność oka modelowego, dzięki czemu korekcja wynosi zero. Wraz ze wzrostem kąta pola widzenia i przechodzeniem promienia głównego przez każdą z soczewek, lokalna obecność dodatniej mocy soczewki sprawia, że układ soczewka-oko staje się bardziej krótkowzroczny, a zatem konieczna jest dalsza korekcja ujemna. Schemat ten obowiązuje dla rysunków od 4 do 9.

Korekcja odległości wykazuje niewielkie przesunięcie nadwzroczności w kierunku obrzeża. Interesujące jest to, że kąty widzenia soczewek zmniejszają się w polu widzenia, a ich efektywna korekcja ulega zmianie, np. przy 28,6° korekcja wynosi -3,7 DS/-2,7 DC (średnia sfera -5,1 D) lub -4,6 DS/-0,6 DC (średnia sfera -4,9 D) w stosunku do korekcji odległości. Krótko mówiąc, dodatki są znacznie wyższe na obrzeżach niż +4 D, które byłyby w pobliżu środka soczewki, i mają znaczny astygmatyzm. Nie wiadomo, czy jest to korzystne, czy nie.

Rys. 4 jest podobny do rys. 3, ale dotyczy oka obracającego się i pola pionowego. Pokazano tylko punkty dyskretne. Krzywizna podstawowa 3,0 D sprawia, że soczewka ta dobrze koryguje widzenie na odległość, z refrakcją +0,2 DS/-0,2 DC (średnia sfera +0,1 D) przy 32,6°, podczas gdy korekcja widzenia z bliska przy tym samym kącie wynosi -4,6 DS/-0,6 DC (-4,9 D). Jeśli chodzi o soczewki Hoya MiyoSmart, istnieje kilka artykułów dotyczących soczewek Essilor Stellest, które są związane z personelem firmy Essilor. W niektórych z nich zbadano kliniczne skutki stosowania „soczewek wysoce asferycznych” i „soczewek lekko asferycznych” w kontroli krótkowzroczności, stwierdzając, że te pierwsze działają znacznie lepiej.<sup>52,53</sup> Nie ma wyraźnego opisu różnicy między tymi dwoma typami, ale wydaje się, że te pierwsze są bardziej wydajne i zapewniają większą głębię ostrości.<sup>53</sup> Soczewki wysoce asferyczne osiągały lepsze wyniki w zakresie kontroli postępu krótkowzroczności i są prawdopodobnie tymi, które są stosowane w soczewkach komercyjnych. Konstrukcja soczewek opiera się na modelu oka krótkowzrocznego Atchisona,<sup>16</sup> ale wykorzystuje kształt siatkówki zmodyfikowany zgodnie z danymi dotyczącymi refrakcji obwodowej chińskich dzieci.<sup>53</sup> Ogniskowa soczewek na obrzeżach wynosi od 1,1 do 1,9 mm.

przed siatkówką.<sup>52</sup>

W jednej publikacji opisano 24-miesięczny postęp krótkowzroczności i długości osiowej w wieku od 8 do 13 lat w grupie kontrolnej, wynoszący średnio 1,46 D i 0,69 mm, oraz w jednej grupie leczonej (soczewki o wysokiej asferyczności), wynoszący średnio 0,66 D (45% postępu w grupie kontrolnej) i 0,34 mm (49%).

odpowiednio.<sup>53</sup> W innym badaniu stwierdzono, że 12-miesięczna progresja krótkowzroczności i długości osiowej była mniejsza w grupie noszącej soczewki Stellest niż w grupie noszącej soczewki Hoya MiyoSmart.<sup>71</sup> Zakres funkcji wzrokowych był podobny w grupie kontrolnej i badanej.<sup>54</sup> W jednym badaniu z wykorzystaniem soczewek o wysokiej asferyczności stwierdzono, że patrzenie przez soczewkę pod kątem 22° w kierunku nosowym i w przybliżeniu przez trzeci pierścień wewnętrzny zmniejszało ostrość widzenia plamki żółtej o około 0,1 logMAR, ale nie miało wpływu na ostrość widzenia peryferyjnego obiektu oglądanego przez środek soczewki.<sup>55</sup> Przeprowadzono również inne badania dotyczące wywołanych zmian w długości peryferyjnej oka i względnej refrakcji peryferyjnej.<sup>56</sup>

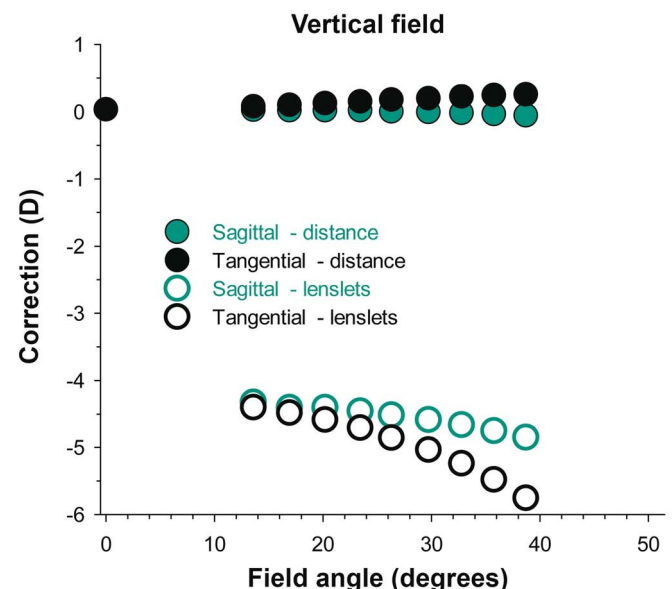
Podobnie jak soczewki MiyoSmart, soczewki Essilor Stellest są wykonane z poliwęglanu o krzywiznie podstawowej 3,0 D (wskaźnik 1,523). Środek soczewek w najbardziej wewnętrznym pierścieniu znajduje się w odległości 5,0 mm od środka soczewki, a każdy pierścień jest przesunięty o kolejne 2,3 mm na zewnątrz, aż do 11. pierścienia, który znajduje się w odległości 28 mm od środka (rys. 11). Sąsiadujące soczewki o średnicy 1,1 mm stykają się ze sobą, a ich liczba waha się od 28 w pierścieniu centralnym do 157 w pierścieniu zewnętrznym. Gantes-Núñez i wsp.<sup>70</sup> stwierdzili podobne właściwości soczewek w pięciu wewnętrznych pierścieniach o mocy centralnej 5,8 D, ale w pierścieniach zewnętrznych moc stopniowo zmniejszała się do 3,5 D w pierścieniu zewnętrznym. Moc większości pierścieni jest znacznie wyższa niż w przypadku soczewek Hoya MiyoSmart (rys. 2).

Rys. 5 przedstawia korekty mocy strzałkowej i stycznej wymagane dla połączenia soczewki i odpowiedniego modelu oka wzdłuż poziomego pola widzenia. Korekta odległości poza osią jest taka sama jak w przypadku soczewki Hoya MiyoSmart. Przy 34,4° korekcja bliska wynosi -5,7 DS/-4,6 DC (średnia sfera -8,0 D) lub -7,1 DS/-1,5 DC (średnia sfera -7,9 D) w stosunku do korekcji dalekiej. Rys. 6 przedstawia odpowiednie wyniki dla pozycji linii ogniskowych względem siatkówki. Znajdują się one znacznie przed siatkówką, będąc

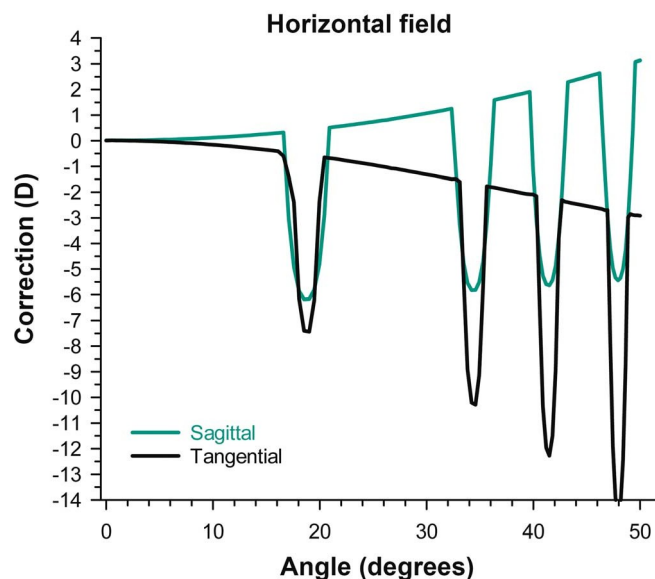
1,6 i 2,7 mm z przodu przy 34,4° i więcej niż zakres od 1,1 do

1,9 mm podany przez Bao i in.<sup>52</sup>

Rys. 7 jest podobny do rys. 5, ale dotyczy oka obracającego się i pola pionowego. Pokazano tylko punkty dyskretne. Jest to dobrze skorygowana soczewka do widzenia na odległość, o refrakcji +0,2 DS/-0,1 DC (średnia sfera +0,1 D) przy 31,1°, podczas gdy korekcja widzenia z bliska przy tym samym kącie wynosi -6,9 DS/-0,9 DC (-7,4 D).

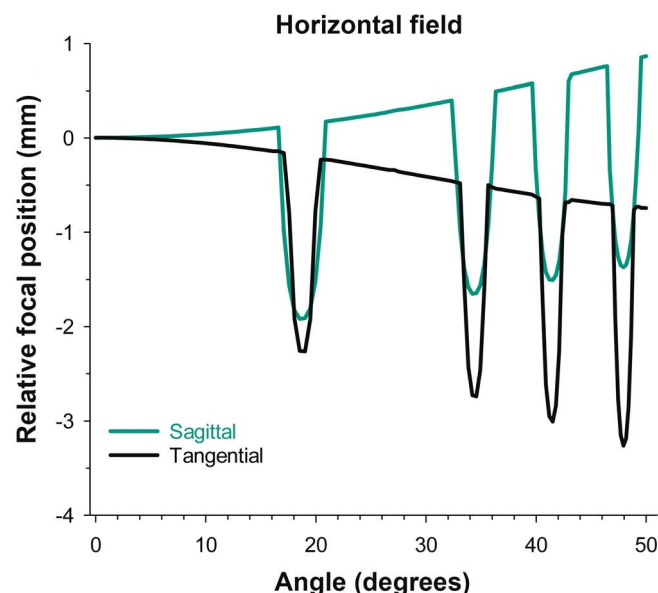


RYSUNEK 4. Korekty mocy strzałkowej i stycznej soczewki Hoya MiyoSmart o mocy -4 D w połączeniu z modelowym okiem obracającym się wzdłuż południka pionowego w pozycjach odpowiadających środkom soczewek.



RYSUNEK 5. Korekty mocy strzałkowej i stycznej soczewki Essilor Stellest -4 D w połączeniu z modelem wzdłuż poziomego pola widzenia. Dopasowania uzyskane na podstawie śledzenia promieni oparto na danych dotyczących aberracji falowej dostarczonych przez Matta Jaskulskiego.

Kolejnym projektem w tej klasie są soczewki Zeiss MyoCare; „Care” to skrót od „Cylindrical Annular Refractive Element” (cyldryczny pierścieniowy element refrakcyjny). W przeciwieństwie do układu pierścieni soczewkowych Essilor Stellest, dodatkowa moc znajduje się w około 30 „cyldrycznych” pierścieniach o szerokości 0,5 mm i oddzielonych od siebie o 0,5 mm. Istnieją dwa warianty: „MyoCare” dla dzieci poniżej 10 roku życia i „MyoCare S” dla starszych dzieci.<sup>42</sup> Pierwszy z nich ma centralną strefę przejrzystą o średnicy 7 mm i średnią dodatkową moc (połowę dodatkowej mocy cyldrycznej) wynoszącą 4,6 D. W przypadku drugiego wariantu wartości te wynoszą odpowiednio 9 mm i +3,8 D. W badaniu trwającym 12 miesięcy Liu



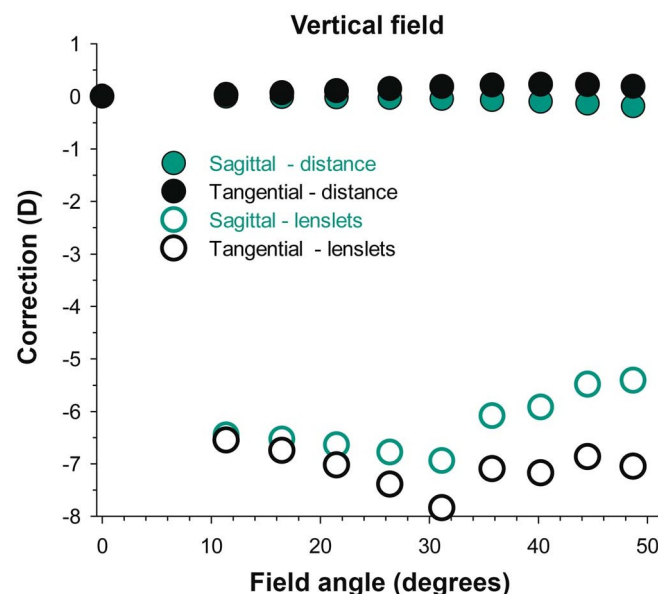
RYSUNEK 6. Położenie ogniskowe w płaszczyźnie strzałkowej i stycznej względem siatkówki soczewki Essilor Stellest o mocy -4 D w połączeniu z modelowym okiem wzdłuż poziomego pola widzenia.

et al.<sup>57</sup> stwierdzili średnie zmiany refrakcji i długości osiowej w grupie kontrolnej wynoszące odpowiednio -0,71 D i 0,35 mm, podczas gdy średnie zmiany w grupie testowej wyniosły -0,56 D (79%) i 0,27 mm (77%). Trwają inne badania kliniczne (np. patrz Alvarez-Peregrina et al.<sup>72</sup>).

### TECHNOLOGIA OPTYKI DYFUZYJNEJ

Podstawą dla tego typu soczewek, produkowanych przez firmę SightGlass Vision, była czwarta teoria przedstawiona we wstępie. Soczewka bazowa jest wykonana z materiału Trivex (PPG Industries, Pittsburgh, PA; współczynnik załamania światła 1,530). Posiada przezroczystą strefę centralną o średnicy 5 mm. Rozpraszacze są przymocowane do soczewki i opisane jako „mające średnicę około 0,14 mm i wysokość około 0,2 mm, z nieregularną krzywizną promieniową, która jest bardziej stroma po bokach i spłaszczona na górze”.<sup>15</sup> Rozpraszacze mają współczynnik załamania światła wynoszący 1,50. Opis dyfuzorów i różnica współczynnika załamania światła między nimi a soczewką bazową wskazują, że występują efekty optyczne wykraczające poza rozpraszanie. Rappon i in.<sup>15</sup> prowadzą badania kliniczne nad dwiema wersjami soczewek z technologią optyki rozpraszającej, jedną z odstępem 0,365 mm między dyfuzorami (test 1, który wydaje się być aktualną wersją komercyjną) i jedną z odstępami 0,240 mm (test 2). Po 12 miesiącach grupa z soczewkami jednoogniskowymi odnotowała średnie zmiany refrakcji i długości osiowej wynoszące odpowiednio -0,54 D i 0,30 mm, podczas gdy średnie zmiany dla grupy testowej 1 wyniosły -0,14 D (26%) i 0,15 mm (50%), a dla grupy testowej 2 -0,22 D (41%) i 0,20 mm (67%).

Firma Internacional Óptica opracowała odmianę soczewki z technologią optyki dyfuzyjnej, zwaną soczewką z wieloma segmentami optyki dyfuzyjnej (DOMS).<sup>58-60</sup> Posiada ona wyraźną, centralną strefę dalekiego widzenia o średnicy 9 mm. Dyfuzory mają średnicę 1,0 mm, są oddzielone 0,75 mm i rozciągają się do średnicy 36 mm (rys. 1K). Nie przeprowadzono jeszcze rozszerzonych badań klinicznych, ale w badaniu z udziałem młodych dorosłych osób z krótkowzrocznością pomiary długości osiowej wykonywano w trzech odstępach czasu podczas zadania czytania: po 20 minutach, po 60 minutach noszenia



RYSUNEK 7. Korekty mocy strzałkowej i stycznej soczewki Essilor Stellest o mocy -4 D w połączeniu z modelowym okiem obracającym się wzdłuż południka pionowego w pozycjach odpowiadających środkom soczewek.

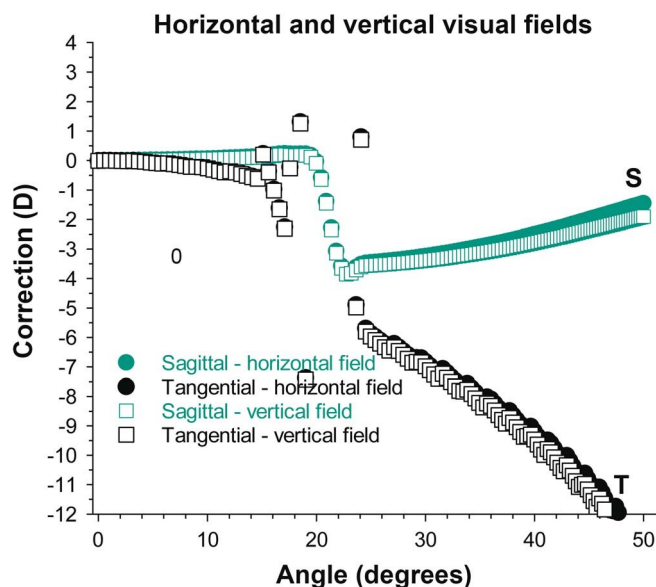
soczewki okularowe jednoogniskowe lub soczewki kontaktowe, a po kolejnych 40 minutach noszenia soczewek DOMS.<sup>59</sup> Długość osiowa wzrosła o  $8 \pm 10$  mm przy drugim pomiarze w stosunku do pierwszego pomiaru, a długość zmniejszyła się o  $11 \pm 9$  mm przy trzecim pomiarze w stosunku do drugiego pomiaru. Przypuszczalnie zmiany długości osiowej były spowodowane zmianami grubości naczyńówki. Autorzy zinterpretowali swoje wyniki jako sugerujące, że soczewki mogą odgrywać potencjalną rolę w kontroli krótkowzroczności.

### KONCENTRYCZNE BIFOKALNE

Firma Opulens (Novar Technologies) opracowała soczewkę dwuogniskową o nazwie „MYOFIX”.<sup>73</sup> Centralna strefa daleka o średnicy 9 mm otoczona jest krótką strefą przejściową, a następnie strefą bliską o mocy około  $+3,50$  D.<sup>24,61</sup> z dodatkiem na tylnej powierzchni (rys. 11). Moc przedniej powierzchni wynosi  $2,04$  D dla materiału o współczynniku załamania światła 1,499. Stosując ten sam protokół, co w przypadku soczewek DOMS,<sup>59</sup> długość osiowa wzrosła o  $16 \pm 7$  mm w drugim 20-minutowym przedziale czasu przy użyciu soczewek jednoogniskowych, a następnie zmniejszyła się o  $9 \pm 4$  mm po kolejnych 40 minutach noszenia soczewek dwuogniskowych koncentrycznych.

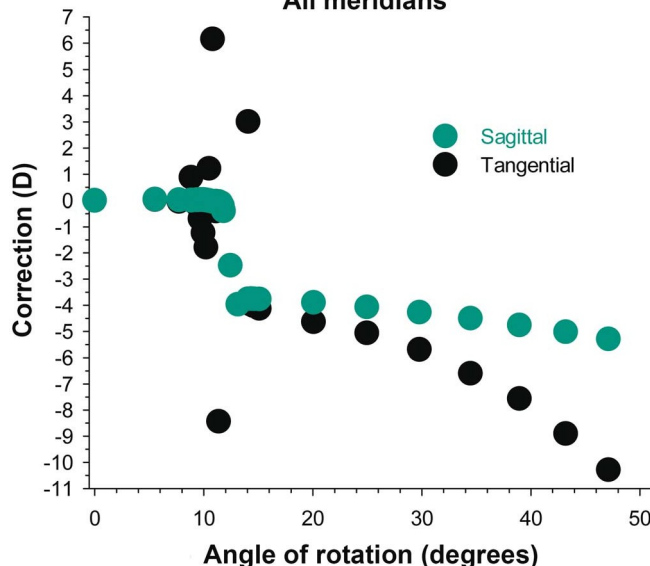
Podobnie jak w przypadku soczewki Hoya MiyoSmart, teoretycznie określiliśmy korekty refrakcji pozaosiowej dla soczewki MYOFIX. Rys. 8 przedstawia obliczone korekty mocy strzałkowej i stycznej wymagane dla połączenia soczewki-4 D i odpowiedniego modelu oka wzdłuż poziomego i pionowego pola widzenia. Korekta odległości wykazuje niewielkie przesunięcie w kierunku obrzeża. Ujemna korekta dla strefy bliskiej działa od około  $23^\circ$ . Przy  $30^\circ$  korekcja wynosi  $-3,1$  DS/ $-3,6$  DC (średnia sfera  $-4,9$  D), a powyżej tej wartości dodatek staje się coraz większy niż określone  $3,5$  D.

Rys. 9 przedstawia dane dla oka obracającego się. Moc jest stabilna do  $10^\circ$  dla widzenia dalekiego, a następnie powyżej  $14^\circ$  dla widzenia bliskiego. Przy  $14^\circ$



RYSUNEK 8. Korekcje mocy strzałkowej i stycznej soczewki Novar Technologies MYOFIX o mocy  $-4$  D w połączeniu z modelowym okiem wzdłuż pionowego i poziomego pola widzenia. Nieciągłości są spowodowane granicami między strefami odległociowymi i przejściowymi oraz między strefami przejściowymi i bliskimi, natomiast brak wygładzenia wynika z różnic powstałych w wyniku próbkowania danych. Dane dotyczące tylnej powierzchni soczewki w postaci „ugięcia siatki” zostały dostarczone przez firmę Novar Technologies.

### All meridians



RYSUNEK 9. Korekty mocy strzałkowej i stycznej soczewki Novar Technologies MYOFIX o mocy  $-4$  D w połączeniu z modelowym okiem z obrotowym modelowym okiem.

Korekcja bliska wynosi  $-3,8$  DS/ $-0,2$  DC, a wzrasta do  $-4,3$  DS/ $-1,4$  DC przy  $30^\circ$ .

Nagle zmiany mocy na krawędzi małej strefy centralnej (rys. 8, 9) oznaczają, że aby zbadać otoczenie w oddali, konieczne jest poruszanie głową, a nie oczami. Autorzy, którzy testowali ten projekt, zauważyli, że „ten specjalny projekt okularów sprawdza się stosunkowo dobrze podczas czytania, ale nie jest tolerowany podczas chodzenia”<sup>24</sup> i wydaje się wątpliwe, czy soczewka jest użyteczna w obecnej formie.

### INNE SOCZEWKI

Soczewki są często projektowane, czasami opatentowane, a nawet poddawane testom w ramach badań, ale nie są produkowane na skalę komercyjną. Kilka z nich opisano poniżej. Dokładne przeszukiwanie literatury patentowej pozwoliłoby znaleźć kilka innych projektów; niektóre z nich mogą zostać w przyszłości wykorzystane w projektach komercyjnych.

Hasebe i wsp.<sup>62</sup> opisali badanie dotyczące „wysoko pozytywnych” asferycznych soczewek progresywnych z dodatkiem  $+1,5$  D. Unikalną cechą tych soczewek była obecność dodatkowej asferyczności w górnej części soczewki, porównywalnej z mocą dodatkową soczewki w środkowej części dolnej strefy widzenia. Oczekiwano, że zmiana mocy obwodowej zwiększy skuteczność kontroli krótkowzroczności w porównaniu z konwencjonalnymi soczewkami progresywnymi, ale tak się nie stało.

Ciekawym, niedawno opatentowanym rozwiązaniem w dziedzinie soczewek jest połączenie soczewki progresywnej i soczewki DIMS, którego celem jest połączenie zalet obu tych rozwiązań.<sup>63</sup> Koncepcja polega na tym, że soczewka progresywna zmniejsza opóźnienie akomodacyjne podczas widzenia z bliska, natomiast nakładka soczewek sferycznych o dużej mocy ( $+3,0$  do  $+4,0$  D) zapewnia skuteczne, choć przerywane, rozogniskowanie krótkowzroczne na płamce żółtej (lub bardzo blisko niej) wędrującego oka podczas widzenia z daleka.

Wreszcie Atchison i wsp.<sup>64</sup> zaprojektowali i opracowali soczewkę korygującą refrakcję sferocylindryczną na obrzeżach. Pozwoliła ona znacznie poprawić ostrość widzenia obwodowego i czułość kontrastową widzenia obwodowego. Chociaż ograniczała się ona tylko do jednego pola widzenia

, autorzy zauważyli, że w odniesieniu do teorii refrakcji obwodowej rozwoju krótkowzroczności „można sobie wyobrazić, że niniejsze badania posłużą jako podstawa do dostosowania obwodowego rozogniskowania, na przykład zapewniając określony poziom względnej krótkowzroczności obwodowej”.

## DYSKUSJA

W niniejszym przeglądzie opisano optykę soczewek okularowych stosowanych w kontroli krótkowzroczności. Optyka niektórych soczewek dwuogniskowych jest prosta, ale inne konstrukcje są znacznie bardziej złożone. Udało nam się stworzyć model niektórych właściwości obrazowania tych złożonych soczewek, dla których dostępne są szczegóły optyczne (Hoya MiyoSmart, Essilor Stellest i Zeiss MyoCare). Jednakże niewiele informacji opublikowano na temat wielu innych soczewek, takich jak większość soczewek progresywnych, i musieliśmy ograniczyć się do opisu ich przeznaczenia i dołączyć uproszczone rysunki optyczne dostarczone przez producenta. Pełne zrozumienie takich soczewek wymaga umiejętności dokładnego pomiaru i rekonstrukcji kształtów powierzchni. Obejmuje to określenie wysokości powierzchni i pochodnych w wielu punktach, a następnie śledzenie promieni i analizę obrazu. Omawiając te soczewki, należy pamiętać, że chociaż ich konstrukcja może być inspirowana teoretycznymi koncepcjami dotyczącymi możliwych mechanizmów hamowania wzrostu krótkowzroczności i długości osiowej (patrz Wprowadzenie), zrozumienie tych mechanizmów jest nadal w powijakach. Projektanci soczewek mogą zatem jedynie starać się dokonywać inteligentnych przypuszczeń dotyczących optymalnych parametrów swoich projektów. Na przykład w projektach wielosegmentowych istnieją znaczne i niewyjaśnione różnice w wyborze średnicy centralnego, przezroczystego obszaru soczewki przez projektanta. W związku z tym istnieje potrzeba uzyskania większej ilości informacji na temat zachowania dzieci podczas noszenia określonych rodzajów soczewek, w szczególności sposobów, w jakie łączą ruchy głowy i oczu, gdy chcą zmienić punkt fiksacji, oraz stopnia, w jakim podczas wykonywania zadań wymagających widzenia z bliska równoważą użycie akomodacji.

Wzrost dodatku mocy zapewniają przez soczewki.

Przedstawiliśmy niektóre wyniki badań niektórych soczewek, ale nie poddaliśmy tych badań krytycznej ocenie pod kątem metodologii i ograniczeń. Zwracamy uwagę na brak niezależności niektórych ostatnich badań, szczególnie dotyczących soczewek Hoya MiyoSmart, Essilor Stellest i Artoptica Perifocal. Jak stwierdzili Radhakrishnan i in.<sup>74</sup>, „Jak dotąd badania kliniczne dotyczące skuteczności soczewek MS [wielosegmentowych] były przeprowadzane przez podmioty mające komercyjny interes w ich sukcesie i istnieje pilna potrzeba niezależnej weryfikacji wyników”.

Długoterminowe badania kliniczne, w których porównuje się rozwój oczu starannie dobranych grup dzieci noszących soczewki jednoogniskowe lub specjalistyczne soczewki „terapeutyczne”, mają kluczowe znaczenie dla ustalenia skuteczności poszczególnych konstrukcji soczewek w kontrolowaniu postępu długości osiowej i krótkowzroczności. Przeprowadzenie takich badań wiąże się z oczywistymi trudnościami, takimi jak dopasowanie początkowych cech grup, zapewnienie zgodności w zakresie noszenia soczewek i uniknięcie rezygnacji uczestników. Nawet po pokonaniu tych trudności zazwyczaj nie jest właściwe porównywanie danych dotyczących skuteczności leczenia krótkowzroczności przy użyciu różnych konstrukcji soczewek, które występują w różnych badaniach, ze względu na różny wiek, początkową refrakcję, pochodzenie etniczne, historię krótkowzroczności rodziców, środowisko i inne cechy charakterystyczne dzieci biorących udział w badaniach.

Niezależnie od kwestii związanych z teoriami, na których się opierają, soczewki wielosegmentowe odniosły znaczny sukces w spowalnianiu wydłużania się osiowego i postępu krótkowzroczności o około 50%. Ze względu na widoczny sukces tych soczewek możemy spodziewać się pojawienia się nowych projektów lub generycznych wersji istniejących soczewek. Istnieje co najmniej jedna z tych ostatnich (MyoStock; CR Labs, Melbourne, Victoria, Australia), która jest powierzchniami podobna do Hoya MiyoSmart i wykorzystuje „sześciokątne segmenty defokusa”, w których soczewki mają kształt sześciokąta, a nie koła.<sup>75</sup> Jednak ponownie powołując się na Radhakrishnan et al.,<sup>74</sup> „Konieczne są dalsze badania w celu zbadania takich kwestii, jak

sposób, w jaki może, forma i rozmieszczenie soczewek MS wpływały na osiągnięte poziomy kontroli, tak aby można było opracować optymalne projekty i ocenić je w badaniach klinicznych”.

Jedną z obaw związanych z leczeniem krótkowzroczności jest możliwość znacznego przyspieszenia postępu choroby po zaprzestaniu leczenia: tzw. „efekt odbicia”. W metaanalizie Sánchez-Tena i wsp.<sup>76</sup> ustalili, że soczewki Hoya MiyoSmart i Essilor Stellest, wraz z ortokorekcją i miękkimi soczewkami kontaktowymi, wykazywały mniejszy efekt odbicia niż atropina i terapia światłem o niskim natężeniu. W przypadku ryzyka wystąpienia efektu odbicia sugeruje się zastosowanie innego sposobu kontroli, np. pilokarpiny, i rzeczywiście istnieją pewne dowody na to, że efekty kontroli można wzmocnić poprzez połączenie leczenia pilokarpiną o niskim stężeniu z soczewkami wielosegmentowymi.<sup>77</sup>

Problem związany z teorią akomodacji krótkowzroczności polega na tym, że chociaż soczewki progresywne mogą zmniejszać opóźnienie akomodacji, a tym samym postęp krótkowzroczności, z czasem może dojść do adaptacji w stopniu, na który wpływ miałyby charakterystyka konstrukcji. Aby sprawdzić tę możliwość, Varnas i wsp.<sup>25</sup> przeprowadzili badanie z wykorzystaniem dwóch soczewek progresywnych u młodych osób dorosłych. Jedną z soczewek miała niskie średnie gradienty mocy na obrzeżach (niskie tempo zmiany mocy) i długość korytarza wynoszącą 14 mm, natomiast druga miała wysokie średnie gradienty mocy na obrzeżach i wąską strefę blizy, a długość korytarza wynosiła 12 mm (rys. 1M). Ta druga soczewka miała wyższy astygmatyzm obwodowy. Adaptacja opóźnienia nastąpiła w ciągu 12 miesięcy, chociaż nie było możliwe określenie różnic między tymi dwoma typami soczewek. Dodatki wzmacniające o wartości 0,50 i 0,75 D pod koniec badania zmniejszyły opóźnienia do wartości uzyskanych na początku badania lub poniżej. Autorzy zalecili, aby moc dodatku była dostosowana do typowych odległości roboczych i została wzmocniona po roku noszenia o co najmniej 0,50 D.

## WNIOSKI

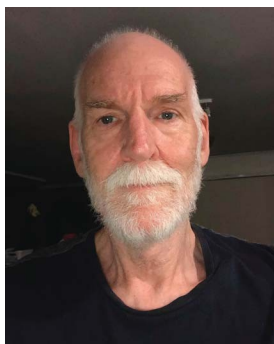
Wiele z opisanych tutaj konstrukcji soczewek okularowych wykazało znaczną skuteczność w spowalnianiu postępu krótkowzroczności i wydłużania się osi gałki ocznej u dzieci, chociaż ograniczony czas trwania dotychczasowych badań nie pozwala jeszcze w pełni potwierdzić, że korzyści te utrzymują się w wieku dorosłym. Dalsza poprawa kontroli krótkowzroczności może wynikać z lepszego zrozumienia optymalnych parametrów obecnych i przyszłych konstrukcji soczewek okularowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Gwiazda J, Thom F, Bauer J, Held R. Dzieci z krótkowzrocznością wykazują niewystarczającą reakcję akomodacyjną na rozmycie obrazu. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1993;34:690–4.
2. Charman WN. Widzenie z bliska, opóźnienia akomodacji i krótkowzroczność. *Ophthalmic Physiol Opt* 1999;19:126–33.
3. Smith EL 3rd. Wykład z okazji przyznania nagrody Prentice Award 2010: Argumenty przemawiające za strategiami leczenia krótkowzroczności za pomocą optyki peryferyjnej. *Optom Vis Sci* 2011;88:1029–44.
4. Atchison DA, Rozema JJ. Uwagi techniczne dotyczące refrakcji obwodowej, długości obwodowej oka i określania kształtu siatkówki. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023;43:584–94.
5. Rosén R, Lundström L, Unso P, Koh P. Czy błędnie zinterpretowaliśmy badania Hoogerheide i in. (1971)? *Optom Vis Sci* 2012;89:1235–7.
6. Atchison DA, Li SM, Li H, et al. Względna nadwzroczność obwodowa nie pozwala przewidzieć rozwoju i postępu krótkowzroczności u dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2015;56:6162–70.
7. Lee TT, Cho P. Względna refrakcja obwodowa u dzieci: dwunastomiesięczne zmiany w oczach z różnymi wadami refrakcji. *Ophthalmic Physiol Opt* 2013;33:283–93.
8. Sng CC, Lin X-Y, Gazzard G, et al. Zmiany refrakcji obwodowej w czasie u chińskich dzieci w Singapurze. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011;52:7880–7.
9. Jonas JB, Ang M, Cho P, et al. Zapobieganie krótkowzroczności i jej postępowi za pomocą IMI. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011;52:62.
10. Berntsen DA, Mutti DO, Zadnik K. Badanie teorii dotyczących postępu krótkowzroczności (STAMP) – projekt i dane wyjściowe. *Optom Vis Sci* 2010;87:823–32.
11. Mutti DO, Zadnik K, Fusaro RE i in. Rozwój optyczny i strukturalny soczewki oka w dzieciństwie. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1998;39:120–33.

12. Neitz M, Neitz J. Mieszanie genów OPN1LW i OPN1MW zakłóca kod splicingu eksonowego, powodując szereg zaburzeń widzenia. *Genes (Basel)* 2021;12:1180.
13. Neitz J, Kuckenbecker J, Neitz M, wynalazcy. Uniwersytet Waszyngtoński, cesjonariusz. Soczewka okulistyczna do leczenia krótkowzroczności. Patent USA 11,543,681 B2; 2023.
14. Kuckenbecker J, Neitz M, Rowland JS i in. Wgląd w przyczyny i zapobieganie krótkowzroczności na podstawie haplotypów genu OPN1LW. *Genes (Basel)* 2022;13:942.
15. Rappon J, Chung C, Young G, et al. Kontrola krótkowzroczności za pomocą soczewek okularowych z optyką dyfuzyjną: wyniki 12-miesięcznego randomizowanego badania kontrolowanego dotyczącego skuteczności i bezpieczeństwa (CYPRESS). *Br J Ophthalmol* 2023;107:1709–15.
16. Atchison DA. Modele optyczne dla ludzkich oczu z krótkowzrocznością. *Vision Res* 2006;46: 2236–50.
17. Mandell RB. Kontrola krótkowzroczności za pomocą korekcji dwuogniskowej. *Am J Optom Arch Am Acad Optom* 1959;36:652–8.
18. Jalie M. Rozdział 12: Soczewki wieloogniskowe. Rozdział 22: Soczewki progresywne. W: *The Principles of Ophthalmic Lenses*. Wydanie 6. Londyn, Wielka Brytania: Association of British Dispensing Opticians; 2021.
19. Varnas SR. Projekty soczewek okularowych do globalnej korekcji krótkowzroczności. Synergia i synchronizacja: podnoszenie standardów opieki okulistycznej na nowy poziom, 9. Krajowy Kongres Optometrii i Optyki, Singapur; 2010.
20. Yeo A, Paillé D, Koh P, Drobe B. Krótkowzroczność i skuteczne rozwiązania w jej leczeniu. *Points de Vue Int Rev Ophthalmic Optics* 2016;56:65.
21. Silva-Leite S, Amorim-de-Sousa A, Queiros A, et al. Refrakcja obwodowa i funkcja wzroku nowej soczewki okulistycznej Perifocal do kontroli postępu krótkowzroczności. *J Clin Med* 2023;12:1435.
22. Rodenstock. Soczewki MyCon. Dostępne na stronie: <https://www.rodenstock.com/lenses/childrens-lenses>. Dostęp: 19 kwietnia 2024 r.
23. Yuval C, Ottem C, Laura BS, et al. Ocena skuteczności soczewek okularowych kontrolujących krótkowzroczność u dzieci w Izraelu: wyniki po 12 miesiącach. *Am J Ophthalmol* 2024;257:103–12.
24. de Tomas M, Kotlik C, Szeps A, et al. Nowe okulary do kontroli krótkowzroczności. *Ophthalmol Clin Exp* 2022;15:e244–7.
25. Varnas SR, Kaphe D, Schmid KL, et al. Wpływ soczewek wieloogniskowych na błędy akomodacyjne w czasie: możliwe implikacje dla kontroli krótkowzroczności. *J Vis* 2023;23:3.
26. Cheng D, Schmid KL, Woo GC, Drobe B. Randomizowane badanie wpływu okularów dwuogniskowych i pryzmatycznych na postęp krótkowzroczności: wyniki z dwóch lat. *Arch Ophthalmol* 2010;128:12–9.
27. Cheng D, Woo GC, Drobe B, Schmid KL. Wpływ okularów dwuogniskowych i pryzmatycznych dwuogniskowych na postęp krótkowzroczności u dzieci: wyniki trzyletniego randomizowanego badania klinicznego. *JAMA Ophthalmol* 2014;132:258–64.
28. Cheng D, Woo GC, Schmid KL. Kontrola postępu krótkowzroczności u dzieci za pomocą soczewek dwuogniskowych. *Clin Exp Optom* 2011;94:24–32.
29. Grosvenor T, Perrigin DM, Perrigin J, Maslovitz B. Badanie kontroli krótkowzroczności w Houston: randomizowane badanie kliniczne. Część II. Raport końcowy zespołu opieki nad pacjentami. *Am J Optom Physiol Opt* 1987;64:482–98.
30. Fulk GW, Cyert LA, Parker DE. Randomizowane badanie wpływu soczewek jednoogniskowych i dwuogniskowych na postęp krótkowzroczności u dzieci z esophorią. *Optom Vis Sci* 2000;77:395–401.
31. Leung JT, Brown B. Postęp krótkowzroczności u chińskich uczniów w Hongkongu jest spowolniony dzięki noszeniu soczewek progresywnych. *Optom Vis Sci* 1999;76:346–54.
32. Edwards MH, Li RW, Lam CS, et al. Badanie dotyczące kontroli krótkowzroczności za pomocą soczewek progresywnych w Hongkongu: projekt badania i główne wyniki. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2002;43:2852–8.
33. Gwiazda J, Hyman L, Hussein M, et al. Randomizowane badanie kliniczne dotyczące wpływu soczewek progresywnych i soczewek jednoogniskowych na postęp krótkowzroczności u dzieci. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2003;44:1492–500.
34. Gwiazda JE, Hyman L, Norton TT, et al. Akomodacja i powiązane czynniki ryzyka związane z postępowaniem krótkowzroczności oraz ich interakcja z leczeniem u dzieci objętych badaniem COMET. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45:2143–51.
35. Hasebe S, Ohtsuki H, Nonaka T, et al. Wpływ soczewek progresywnych na postęp krótkowzroczności u japońskich dzieci: prospektywne, randomizowane, podwójnie ślepe, krzyżowe badanie kliniczne. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008;49:2781–9.
36. Yang Z, Lan W, Ge J, et al. Skuteczność soczewek progresywnych w hamowaniu postępu krótkowzroczności u chińskich dzieci. *Ophthalmic Physiol Opt* 2009;29:41–8.
37. Bertsen DA, Barr CD, Mutti DO, Zadnik K. Rozmycie obwodowe i postęp krótkowzroczności u dzieci z krótkowzrocznością, losowo przydzielonych do noszenia okularów jednoogniskowych i progresywnych. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013;54:5761–70.
38. Bertsen DA, Sinnott LT, Mutti DO, Zadnik K. Randomizowane badanie z wykorzystaniem soczewek progresywnych w celu oceny teorii postępu krótkowzroczności u dzieci z dużym opóźnieniem akomodacji. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012;53:640–9.
39. Chung K, Mohidin N, O'Leary DJ. Niedokładna korekcja krótkowzroczności raczej przyspiesza niż hamuje postęp krótkowzroczności. *Vision Res* 2002;42:2555–9.
40. Adler D, Millodot M. Możliwy wpływ niedokorygowania na postęp krótkowzroczności u dzieci. *Clin Exp Optom* 2006;89:315–21.
41. Kanda H, Oshika T, Hiraoka T, et al. Wpływ soczewek okularowych zaprojektowanych w celu zmniejszenia względnej nadwzroczności obwodowej na postęp krótkowzroczności u japońskich dzieci: dwuletnie wielośrodkowe randomizowane badanie kontrolowane. *Jpn J Ophthalmol* 2018;62:537–43.
42. Zeiss Vision Care. Soczewki ZEISS do kontroli krótkowzroczności — specjalistyczna opieka nad oczami dzieci. Dostępne na stronie: <https://www.zeiss.com/vision-care/en/need-new-lenses/myopia-management-lenses.html>. Dostęp: 28 lutego 2024 r.
43. Zeiss Vision Care. Rozwiązania ZEISS w zakresie soczewek do korekcji krótkowzroczności SN\_20\_200\_02391. Wewnętrzny dokument firmowy; 2018 r.
44. Tarutta EP, Proskurina OV, Tarasova NA, et al. Długoterminowe wyniki korekcji soczewek okularowych z defokusem okólnym u dzieci z postępującą krótkowzrocznością [w języku rosyjskim, ze streszczeniem w języku angielskim]. *Vestn Oftalmol* 2019;135:46–53.
45. Tarutta E, Proskurina OV, Milash S, et al. Defokussowanie peryferyjne wywołane przez okulary „Perifocal-M” a postęp krótkowzroczności u dzieci [w języku rosyjskim, ze streszczeniem w języku angielskim]. *Russ Pediatr Ophthalmol* 2015;10:33–7.
46. Li Y, Fu Y, Wang K, et al. Ocena skuteczności kontroli postępu krótkowzroczności przez soczewki wielosegmentowe z defokusem (DIMS) i soczewki okularowe z progresywnym dodatkiem (PAL) u dzieci w wieku od 6 do 12 lat: protokół badania prospektywnego, wielośrodkowego, randomizowanego badania kontrolowanego. *Trials* 2020;21:279.
47. Lam CS, Tang WC, Tse DY, et al. Soczewki okularowe z wieloma segmentami z wbudowanym defokusem (DIMS) spowalniają postęp krótkowzroczności: 2-letnie randomizowane badanie kliniczne. *Br J Ophthalmol* 2020;104:363–8.
48. Lam CS, Tang WC, Qi H, et al. Wpływ noszenia okularów z soczewkami wielosegmentowymi z defokusem na funkcje wzrokowe u chińskich dzieci z krótkowzrocznością. *Transl Vis Sci Technol* 2020;9:11.
49. Zhang HY, Lam CS, Tang WC, et al. Soczewki okularowe z wieloma segmentami i defokusem zmieniły względną refrakcję obwodową: 2-letnie randomizowane badanie kliniczne. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2020;61:53.
50. Zhang HY, Lam CS, Tang WC, et al. Zmiany względnej refrakcji obwodowej u dzieci, które przeszły z soczewek jednoogniskowych na soczewki wielosegmentowe z defokusem. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023;43:319–26.
51. Chun RK, Zhang H, Liu Z, et al. Soczewki okularowe z wieloma segmentami defokusa (DIMS) zwiększają grubość naczyniówki: dwuletnie randomizowane badanie kliniczne. *Eye Vis (Lond)* 2023;10(1):39.
52. Bao J, Yang A, Huang Y, et al. Skuteczność soczewek okularowych z asferycznymi soczewkami w kontrolowaniu krótkowzroczności w ciągu jednego roku. *Br J Ophthalmol* 2022;106:1171–6.
53. Bao J, Huang Y, Li X, et al. Soczewki okularowe z asferycznymi soczewkami do kontroli krótkowzroczności w porównaniu z soczewkami okularowymi jednoogniskowymi: randomizowane badanie kliniczne. *JAMA Ophthalmol* 2022;140:472–8.
54. Gao Y, Lim EW, Yang A, et al. Wpływ soczewek okularowych do kontroli krótkowzroczności na funkcje wzrokowe. *Ophthalmic Physiol Opt* 2021;41:1320–31.
55. Gao Y, Lim EW, Drobe B. Wpływ soczewek okularowych kontrolujących krótkowzroczność z wysocą asferycznymi soczewkami na ostrość widzenia peryferyjnego i ostrość widzenia centralnego przy spojrzeniu peryferyjnym. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023;43:566–71.
56. Huang Y, Zhang J, Yin Z, et al. Wpływ soczewek okularowych z asferycznymi soczewkami na długość obwodową oka i refrakcję obwodową u dzieci z krótkowzrocznością: 2-letnie randomizowane badanie kliniczne. *Transl Vis Sci Technol* 2023;12:15.
57. Liu X, Wang P, Xie Z, et al. Skuteczność kontroli krótkowzroczności przez rok stosowania soczewek okularowych z cylindrycznym pierścieniowym elementem refrakcyjnym. *Acta Ophthalmol* 2023;101:651–7.
58. Internacional Óptica. Majestic myopia. Dostępne na stronie: <https://majesticmyopia.com/>. Dostęp: 28 lutego 2024 r.
59. Szeps A, de Tomas M, Kotlik C, Iribarren R. Zmiany długości osiowej przy użyciu okularów z wieloma segmentami optyki dyfuzyjnej (DOMS) do kontroli krótkowzroczności. *Ophthalmol Clin Exp* 2023;16:e148–54.
60. de Tomas M, Szeps A, Martin G, et al. Cienie siatkówkowe wytwarzane przez okulary kontrolujące krótkowzroczność. *Ophthalmic Physiol Opt* 2024;44:214–8.
61. Iribarren R, Szeps A, Kotlik C, et al. Krótkoterminowe zmiany długości osiowej w oczach krótkowzrocznych wywołane przez okulary defokusowe do kontroli krótkowzroczności. *Photonics* 2022;10:668.
62. Hasebe S, Jun J, Varnas SR. Kontrola krótkowzroczności za pomocą soczewek progresywnych o dodatniej asferyczności: 2-letnie, wielośrodkowe, randomizowane, kontrolowane badanie. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55:7177–88.
63. Varnas SR, Spratt RS, Kratzer T i in., wynalazcy. Carl Zeiss International GmbH, cesjonariusz Soczewki progresywne do kontroli krótkowzroczności i metoda ich produkcji. Patent USA 11,782,293 B2; 2023.
64. Atchison DA, Mathur A, Varnas SR. Wydajność wzrokowa przy użyciu soczewek korygujących obwodowe wady refrakcji. *Optom Vis Sci* 2013;90:1304–11.
65. Varnas S, Gu X, Metcalfe A. Bayesowska metaanaliza kontroli krótkowzroczności za pomocą soczewek wieloogniskowych. *J Clin Med* 2021;10:730.

66. Tarutta EP, Tarasova NA, Proskurina OV, Milash SV. Obwodowe rozmycie obrazu w oczach krótkowzrocznych korygowane okularami Perifocal-M, okularami jednoogniskowymi i miękkimi soczewkami kontaktowymi [w języku rosyjskim, z angielskim streszczeniem]. *Russ Ophthalmol J* 2018; 11:6–42.
67. Papadogiannis P, Borjeson C, Lundström L. Porównanie optycznych metod kontroli krótkowzroczności: wpływ na jakość obrazu obwodowego i widzenie. *Biomed Opt Express* 2023;14:3125–37.
68. Jaskulski M, Singh NK, Bradley A, et al. Właściwości optyczne i obrazowe nowatorskich wielosegmentowych soczewek okularowych zaprojektowanych w celu spowolnienia postępu krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt* 2020;40:549–56.
69. Radhakrishnan H, Lam CSY, Charman WN. Wielosegmentowe soczewki okularowe do kontroli krótkowzroczności. Część 1: Optyka. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023; 43:1125–36.
70. Gantes-Núñez J, Jaskulski M, Lopez-Gil N, Kollbaum PS. Charakterystyka optyczna dwóch nowych soczewek okularowych do kontroli krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023;43:388–401.
71. Guo H, Li X, Zhang X, et al. Porównanie wpływu soczewek o wysokim stopniu asferyczności z soczewkami wielosegmentowymi z wbudowanym defokusem na kontrolę krótkowzroczności. *Sci Rep* 2023;13:3048.
72. Alvarez-Peregrina C, Sanchez-Tena MA, Martinez-Perez C, et al. Ocena kliniczna MyoCare w Europie (CÉME): Protokół badania prospektywnego, wieloośrodkowego, randomizowanego, podwójnie ślepego i kontrolowanego badania klinicznego. *Trials* 2023;24:674.
73. Novar Technologies. Edukacja wykraczająca poza wzrok. Dostępne na stronie: <https://campus.novar-tech.com/>. Dostęp: 28 lutego 2024 r.
74. Radhakrishnan H, Lam CS, Charman WN. Soczewki okularowe wielosegmentowe do kontroli krótkowzroczności. Część 2: Wpływ na postęp krótkowzroczności. *Ophthalmic Physiol Opt* 2023;43:1137–44.
75. MiVision. Wprowadzenie na rynek konkurencyjnych cenowo soczewek do korekcji krótkowzroczności — MiVision. Dostępne na stronie: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=Cost+Competitive+Myopia+Lens+Launched+~+mivision>. Dostęp: 23 marca 2024 r.
76. Sánchez-Tena MA, Ballesteros-Sánchez A, Martínez-Perez C, et al. Ocena zjawiska odbicia w różnych metodach leczenia krótkowzroczności: przegląd systematyczny. *Ophthalmic Physiol Opt* 2024;44:270–9.
77. Nucci P, Lambo A, Schiavetti I, et al. Porównanie kontroli krótkowzroczności u europejskich dzieci i młodzieży przy użyciu okularów z wieloma segmentami z defokusem (DIMAS), atropiny i kombinacji DIMS/atropiny. *PLoS One* 2023; 18(2):e0281816.



David A. Atchison, dr, dr hab., FAAO, jest profesorem optometrii na Queensland University of Technology w Brisbane w Australii. Prowadzi zajęcia dydaktyczne i badania naukowe w dziedzinie optyki okulistycznej i optyki wizualnej. Jest współautorem 2 książek (*The Eye and Visual Optics*, 1997; *Optics of the Human Eye*, wydanie drugie, 2023), 8 rozdziałów w książkach oraz ponad 300 artykułów w czasopismach poświęconych *naukom o wzroku i optyce*. Jego osiągnięcia obejmują nagrody im. Glenna A. Fry'ego i Garlanda W. Claya oraz stypendium Amerykańskiej Akademii Optometrii.



Dr W. Neil Charman, DSc, jest emerytowanym profesorem Uniwersytetu w Manchesterze, gdzie przez wiele lat prowadził zajęcia dydaktyczne i badania naukowe na ówczesnym Wydziale Optometrii. Jego zainteresowania obejmują optykę wzrokową, w szczególności aberrację i akomodację oka, a także rozwój i korekcję wad refrakcji. Otrzymał nagrodę Charlesa F. Prentice'a od Amerykańskiej Akademii Optometrii i jest honorowym członkiem Kolegium Optometrystów.