

Częstotliwość przestrzenna środowisk a krótkowzroczność: systematyczny przegląd powiązanych dowodów i mechanizmów leżących u podstaw tego zjawiska

Dan-Lin Li⁽¹⁾  | Carla Lanca^(2,3) | Xiu-Juan Zhang⁽⁴⁾ | Andrzej Grzybowski⁽⁵⁾  |
Xian-Gui He⁽⁶⁾  | Chen-Wei Pan⁽¹⁾ 

¹ Szkoła Zdrowia Publicznego, Suzhou Medical College Uniwersytetu Soochow, Suzhou, Chiny

² Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa (ESTeSL), Instituto Politécnico de Lisboa, Lizbona, Portugalia

³ Comprehensive Health Research Center (CHRC), Escola Nacional de Saúde Pública, Universidade Nova de Lisboa, Lizbona, Portugalia

⁴ Katedra Okulistyki, Wydział Medyczny LKS, Uniwersytet w Hongkongu, Hongkong, Chiny

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

⁶ Centrum Profilaktyki i Leczenia Chorób Oka w Szanghaju, Szpital Okulistyczny w Szanghaju, Wydział Medyczny Uniwersytetu Tongji, Szanghaj, Chiny

Korespondencja

Chen-Wei Pan, Szkoła Zdrowia Publicznego, Suzhou Medical College Uniwersytetu Soochow, 199 Ren Ai Road, Suzhou 215123, Chiny.
E-mail: pcwonly@gmail.com

Informacje o finansowaniu

Krajowy program badań i rozwoju Chin, numer grantu/nagrody: 2024YFC2510800 i 2024YFC2510801

Streszczenie

Cel: Wcześniejsze badania na zwierzętach wykazały związek między częstotliwością przestrzenną a krótkowzrocznością. Najnowsze badania przeprowadzone na ludziach sugerują, że zmniejszona zawartość wysokich częstotliwości przestrzennych w otoczeniu wizualnym może być czynnikiem przyczyniającym się do rozwoju krótkowzroczności. Niniejsze badanie ma na celu przegląd literatury i wyjaśnienie potencjalnych mechanizmów biologicznych łączących częstotliwość przestrzenną z krótkowzrocznością.

Metody: Przeprowadzono systematyczne wyszukiwanie w bazach danych PubMed i Web of Science. Uwzględniono badania opublikowane od momentu ich powstania do sierpnia 2024 r., które dotyczyły związku między częstotliwością przestrzenną a krótkowzrocznością. Uwzględniono wyłącznie artykuły w języku angielskim w pełnej wersji. Do oceny ważności danych wykorzystano protokół PRISMA. **Wyniki:** W niniejszym przeglądzie uwzględniono łącznie 13 artykułów, w tym siedem badań na modelach zwierzęcych, cztery badania populacyjne, jedną analizę obrazową i jedno badanie dotyczące projektu badawczego. Dowody epidemiologiczne są stosunkowo ograniczone i zaczęły pojawiać się dopiero w ostatnich latach. Stwierdzono, że średnie i wysokie częstotliwości przestrzenne odgrywają ważną rolę w procesie emmetropizacji oka. Niskie częstotliwości przestrzenne mogą zwiększać ryzyko wystąpienia krótkowzroczności. Ponadto potencjalne mechanizmy wpływu częstotliwości przestrzennej na krótkowzroczność podsumowano jako cechy przetwarzania informacji wzrokowej, funkcję akomodacji oka i ruchy gałki ocznej, wrażliwość na kontrast oraz odpowiednie cząsteczki biorące udział w tym procesie.

Wniosek: Dowody sugerują, że częstotliwość przestrzenna w pomieszczeniach może mieć związek z rozwojem krótkowzroczności. Konieczne są dalsze badania, aby zrozumieć, czy wprowadzenie zmian w środowisku wewnętrznym jest pomocne w zapobieganiu i kontrolowaniu krótkowzroczności.

SŁOWA KLUCZOWE

krótkowzroczność, częstotliwość przestrzenna, przegląd systematyczny

1 | WPROWADZENIE

Krótkowzroczność jest jedną z najczęstszych wad refrakcji u dzieci i młodzieży, stanowiącą poważny problem zdrowia publicznego na całym świecie (Dolgin, 2015; Jonas i in., 2021). Na przestrzeni lat globalna częstość występowania krótkowzroczności, szczególnie w krajach Azji Wschodniej i Singapurze, wzrastała (Morgan i in., 2018; Spillmann, 2020). Szacuje się, że do 2050 r. krótkowzroczność dotknie 5 miliardów ludzi na całym świecie, a co dziesiąta osoba będzie cierpieć na wysoką krótkowzroczność (Holden i in., 2016). Krótkowzroczność, charakteryzująca się wysoką częstością występowania i wyraźnym przesunięciem w kierunku młodszych grup wiekowych, stanowi podwyższone ryzyko rozwoju

wysoka krótkowzroczność, która z kolei predysponuje osoby do powikłań zagrażających wzrokowi, takich jak zwyrodnienie plamki żółtej związane z krótkowzrocznością i odwarstwienie siatkówki (Flitcroft i in., 2019; Sun i in., 2015). Ponadto obciążenie ekonomiczne związane z leczeniem krótkowzroczności jest znaczne. Według badania przeprowadzonego przez Fricke i wsp. (Fricke i wsp., 2023) podstawowa korekcja krótkowzroczności, taka jak soczewki jednoogniskowe, jest kosztowna i wynosi 7437 USD w Australii oraz 8006 USD w Chinach (w całym okresie życia). Leczenie postępującej krótkowzroczności, w tym krople do oczu z atropiną, okulary kontrolujące krótkowzroczność, wieloogniskowe miękkie soczewki kontaktowe kontrolujące krótkowzroczność i ortokorekcja, jest znacznie droższe niż zabiegi korekcyjne (Ma i in., 2022). W związku z tym inwestycja finansowa wymagana do leczenia krótkowzroczności

stanowi znaczny wydatek zarówno dla społeczeństwa, jak i dla poszczególnych rodzin. Biorąc pod uwagę wieloaspektową etiologię krótkowzroczności, identyfikacja i eliminacja czynników ryzyka, zwłaszcza tych modyfikowalnych środowiskowo i behawioralnie, ma zasadnicze znaczenie dla skutecznych strategii profilaktyki i kontroli (Bullimore i in., 2021; Jonas i in., 2021).

Oprócz długości fali i natężenia oświetlenia, częstotliwość przestrzenna stała się potencjalnym czynnikiem chroniącym przed krótkowzrocznością podczas aktywności na świeżym powietrzu (Flitcroft i in., 2020; Schaeffel, 2006). Częstotliwość przestrzenna jest definiowana jako liczba cykli na stopień kąta widzenia sinusoidalnej modulacji jasnych i ciemnych elementów w obrazie lub bodźcu, mierzona w cyklach na stopień (cpd). (L & K, 1990). W życiu codziennym odnosi się to do rozmieszczenia przestrzennego, rozmieszczenia obiektów i poziomów kontrastu w otoczeniu (Flitcroft et al., 2020). Dla ludzkiego oka częstotliwość przestrzenna reprezentuje liczbę zmian sinusoidalnej siatki w danym kącie widzenia, wskazując tempo zmian między jasnymi i ciemnymi paskami (Hess et al., 2006; Tolhurst et al., 1992). Niższe częstotliwości przestrzenne odpowiadają wolniejszym zmianom, podczas gdy wyższe częstotliwości przestrzenne oznaczają szybsze zmiany (Hess et al., 2006). Komórki w układzie wzrokowym wykazują różne właściwości częstotliwości przestrzennej, a ich wspólne działanie przyczynia się do zróżnicowanej wrażliwości oka na różne częstotliwości przestrzenne (Chen i in., 2018). Rozpoznawanie scen, szybki, zautomatyzowany i niezawodny proces, w dużym stopniu opiera się na skutecznym kodowaniu złożonych scen naturalnych, w których kluczową rolę odgrywają atrybuty częstotliwości przestrzennej (Kauffmann i in., 2015; Kihara & Takeda, 2010). Analiza wzrokowa wyodrębnia cechy z różnych częstotliwości przestrzennych, głównie zgodnie z sekwencją przetwarzania „od grubsza do drobnziarnistego” (Bullier, 2001; Kauffmann et al., 2015). Badania wykazały, że reakcje na częstotliwość przestrzenną różnią się w zależności od stanu refrakcji, co sugeruje potencjalny wpływ na krótkowzroczność (Day i in., 2009; Maiello i in., 2017). Jednakże, mimo że badania nad charakterystyką częstotliwości przestrzennej w dziedzinie widzenia komputerowego rozpoczęły się ponad 40 lat temu, badania łączące ją z krótkowzrocznością rozpoczęły się nieco później i obecnie obejmują głównie modele zwierzęce i badania obrazów wizualnych (Kerber i in., 2016; McGonigle i in., 2016; Schmid & Wildsoet, 1997). Pomimo tych wysiłków, systematyczne zrozumienie sposobu, w jaki częstotliwość przestrzenna moduluje krótkowzroczność, pozostaje niejasne, zwłaszcza z perspektywy zdrowia publicznego, co ogranicza jej przełożenie na środki i politykę interwencji zdrowotnej.

Niniejszy przegląd ma na celu opisanie związku między częstotliwością przestrzenną a krótkowzrocznością, łącząc wyniki badań przeprowadzonych zarówno na modelach zwierzęcych, jak i badaniach epidemiologicznych przeprowadzonych na ludziach. Badając podstawowe mechanizmy biologiczne, staramy się odkryć potencjalne kierunki badań w zakresie zapobiegania i leczenia krótkowzroczności.

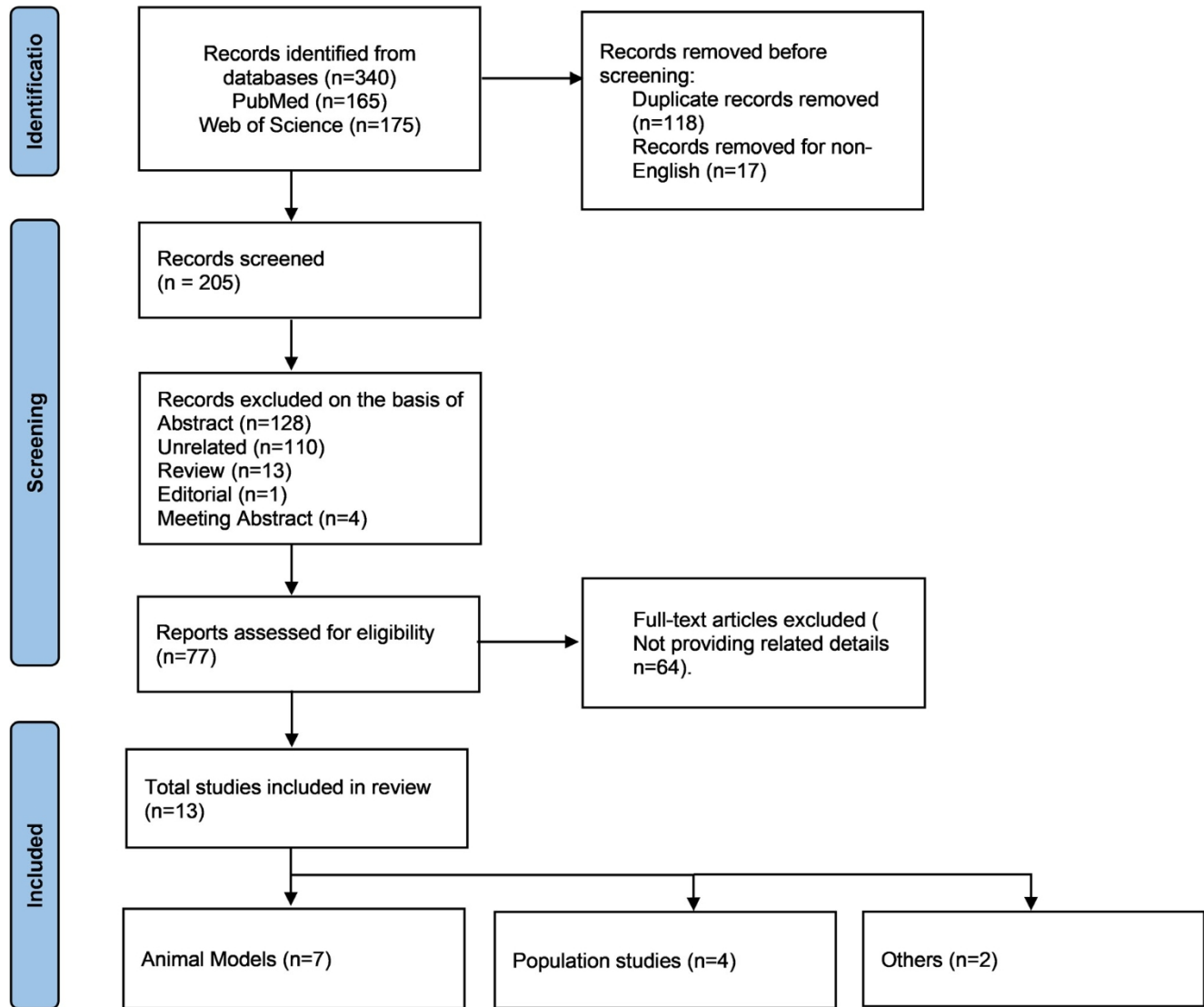
2 | MATERIAŁY I METODY

Zebrano literaturę dotyczącą związku między krótkowzrocznością a częstotliwością przestrzenną, wykorzystując Medical Subject Headings (MeSH) i słowa dowolne w połączeniu z [(„częstotliwość przestrzenna” lub „spektrum przestrzenne”) oraz („krótkowzroczność” lub „niedowidzenie” lub „wada refrakcji” lub „ametropia”)]

od momentu ich powstania do sierpnia 2024 r. Wyszukiwanie przeprowadzono w bazach danych Web of Science i PubMed. Wszystkie znalezione artykuły zostały zaimportowane do programu EndNote 21 w celu zarządzania nimi i ich przeglądu. Niniejszy przegląd został przeprowadzony zgodnie z wytycznymi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analyses) (Page et al., 2021). Protokół naszego badania zarejestrowaliśmy w Międzynarodowym Rejestrze Prospektywnych Przeglądów Systematycznych (CRD42024585924).

Badania zostały wybrane zgodnie z następującymi kryteriami: (1) temat badań jest związany z częstotliwością przestrzenną i krótkowzrocznością lub wskaźnikami związanymi z krótkowzrocznością, w tym długością osiową, promieniem rogówki, głębokością przedniej komory oka itp.; (2) badania zostały opublikowane w języku angielskim; (3) artykuły są publikacjami pełnotekstowymi; (4) przedmiotem badań są populacje lub zwierzęta, z wyłączeniem przeglądów, opisów przypadków, streszczeń konferencyjnych i artykułów redakcyjnych. Proces selekcji jest przeprowadzany niezależnie przez dwóch badaczy, a w przypadku braku porozumienia do oceny dołącza trzecia osoba. Głównym wynikiem był ekwiwalent sferyczny, natomiast wyniki drugorzędne obejmowały wskaźniki związane z krótkowzrocznością, w tym długość osiową, promień rogówki, głębokość przedniej komory oka i głębokość komory szklistej. Ponieważ przedmiotem badań był związek między częstotliwością przestrzenną a krótkowzrocznością, z niniejszego przeglądu wykluczono podstawowe mechanizmy patologiczne, oświetlenie i widmo. W wyniku wyszukiwania zidentyfikowano 340 artykułów, z których ostatecznie uwzględniono 13. Schemat badania przedstawiono na [rysunku 1](#).

Jakość badań populacyjnych oceniono za pomocą skali jakości Newcastle-Ottawa (NOS). Skala ta ocenia badania na podstawie doboru grup badawczych, porównywalności grup i ustalenia interesujących wyników. Badania, które uzyskały od 7 do 9 punktów, zostały sklasyfikowane jako wysokiej jakości, od 4 do 6 punktów jako średniej jakości, a 3 lub mniej punktów jako niskiej jakości (Stang, 2010). W przypadku badań na zwierzętach do oceny jakości wykorzystano Stroke Therapy Academic Industry Roundtable (STAIR) (Fisher et al., 2009). STAIR sformułowało „Wytyczne dotyczące utrzymania rygorystycznych badań naukowych”, które obejmują siedem aspektów, w tym obliczenie wielkości próby, kryteria włączenia i wyłączenia uczestników, proces randomizacji, ukrywanie przydziału, dokumentację zwierząt nieobjętych analizą, ślepą ocenę wyników oraz ujawnianie potencjalnych konfliktów interesów wraz ze szczegółowymi informacjami dotyczącymi finansowania badania.



RYS UNEK 1 Schemat blokowy badania „ ”.

& Wildsoet, 2005; Hess et al., 2006; Schmid & Wildsoet, 1997; Zhi et al., 2013). Poza zwykłą obserwacją modele te umożliwiły głębsze zrozumienie mechanizmów leżących u podstaw rozwoju refrakcji. Charakterystykę siedmiu badań podsumowano w tabeli 1. Ocenę jakości literatury przedstawiono w tabeli S1 i wyraźnie widać, że jakość literatury jest ogólnie niska. W szczególności badania te nie zawierały istotnych wyników w zakresie obliczania wielkości próby, kryteriów włączenia i wyłączenia, randomizacji, ukrywania przydziału, analizy wykluczenia raportów dotyczących zwierząt oraz zaślepienia oceny wyników, co może ograniczać nasze zrozumienie i ocenę tych badań eksperymentalnych na zwierzętach.

Wyniki uwzględnionych badań podkreślają niezwykle wrażliwość emmetropizacji na częstotliwość przestrzenną otoczenia wizualnego (Norton & Siegwart, 2013; Rucker, 2019; Zhang & Zhu, 2022). Ponadto próg kontrastu wymagany do skutecznej kompensacji wad refrakcji jest ściśle powiązany ze składem częstotliwości przestrzennej obrazu siatkówkowego, co podkreśla znaczenie jednoczesnego uwzględnienia obu czynników w badaniach nad emmetropizacją (Marcos et al., 1999a). W badaniach Zhi uwzględniono jednocześnie zarówno

kontrastu, jak i częstotliwości przestrzennej, co podkreśla konieczność stosowania kompleksowego protokołu stymulacji wzrokowej (Zhi i in., 2013).

Tworząc środowiska o zróżnicowanych częstotliwościach przestrzennych, większość badań opierała się na obrazach o zmiennych częstotliwościach przestrzennych pasków, wykorzystując fizyczny rozmiar częstotliwości przestrzennych jako wskaźnik postrzeganej częstotliwości przestrzennej (Hess i in., 2006; Schmid i Wildsoet, 1997; Zhi i in., 2013). Jednak w określonych scenariuszach postrzegana częstotliwość siatki może się różnić w zależności od tła wizualnego i odległości zwierzęcia od bodźca, co jest czynnikiem brany pod uwagę tylko w wybranych badaniach (Zhi i in., 2013). Należy zauważyć, że powszechnie stosowanym podejściem jest również wykorzystanie folii Bangertera o różnej gęstości do symulacji środowisk o różnych częstotliwościach przestrzennych (Bowrey i in., 2015; Smith & Hung, 2000; Tran i in., 2008). Folie te powodują monotoniczny wzrost tłumienia wyższych częstotliwości przestrzennych, przy czym granica odcięcia zmienia się w sposób w przybliżeniu stopniowy, w zależności od grubości folii.

Wyniki badań przeprowadzonych na modelach zwierzęcych podkreślają złożone interakcje między różnymi czynnikami wzrokowymi a powstawaniem wad refrakcji. Dostarczają one dogłębnych informacji

TABELA 1 Charakterystyka badań na zwierzętach dotyczących związku między częstotliwością przestrzenną a refrakcją.

Autor i data	Zwierzę	SF	Wskaźnik refrakcji	Główne wyniki
Schmid & Wildsoet, 1997	Chick	Wysoki SF (4,3 c/d); średni SF (0,86 c/d); niska częstotliwość przestrzenna (0,086 c/d); wysoka–niska częstotliwość przestrzenna (4,3 i 0,086 c/d); mieszana SF (4,3 i 0,86 i 0,086 c/d)	SE; ACD	Średnia i mieszana częstotliwość przestrzenna środowiska znacznie ograniczone reakcja na depriację formy
Smith & Hung, 2000	Monkey	„LP” (najsilniejszy) dyfuzor Bangertera, 0,1 (średni) dyfuzor Bangertera, 0,4 (najsłabszy) dyfuzor Bangertera	SE, VCD	Chroniczne zmniejszenie obrazu kontrastu związanego z optycznym dyfuzji spowodowało krótkowzroczność osiową u młodych małp, a stopień zmieniał się bezpośrednio wraz ze stopniem pogorszenia jakości obrazu
Diether & Wildsoet, 2005	Kurczak	Standardowe i „maltese cross” paski (wyższa SF)	SE, AL	Kompensacja krótkowzroczności miał duży wpływ na obecność średnich i wysokich częstotliwości przestrzennych w bodźcu
Hess et al., 2006	Pisklę	Wysoka częstotliwość przestrzenna (2,17 c/d); średnia częstotliwość przestrzenna (0,52 c/d); komórki siatkówki o niskim SF (0,08 c/d)	SE, AL	Całkowita aktywność w podgrupie komórek siatkówki reagujących w wyższym zakresie częstotliwości przestrzennej może być wystarczająca do napędzania proces emmetropizacji
Tran i in., 2008	Chick	Tylko soczewka plano; Soczewka plano +0,6 Filtr Bangertera; soczewka plano +0,1 Filtr Bangertera; Soczewka Plano+ <0,1 Filtr Bangertera; Soczewka Plano+ Światło Percepcja Filtr Bangertera	SE, AL	Średnia częstotliwość przestrzenna odgrywa ważną rolę w regulacji wzrostu, a tym samym emmetropizacja
Zhi i in., 2013	Świnki morskie	Szary, sinusoidalny, kwadratowy i normalny grupy kontrolne	SE, AL, VCD	Konieczne są bodźce wzrokowe przestrzenne do osiągnięcia emmetropizacji i utrzymanie stabilnego stanu refrakcji po emmetropizacji
Bowrey i in., 2015	Świnki morskie	Pięć folii Bangertera (0,8, 0,6, 0,4, 0,2, tylko percepcja światła)	SE, AL	Brak percepcji częstotliwości przestrzennej Informacje zawarte w oczach mogą prowadzić do długotrwałego obniżenia funkcji przenoszenia modulacji, co skutkuje krótkowzrocznością

Skróty: ACD, głębokość przedniej komory oka; AL, długość osiowa; c/d, cye/deg.; SE, ekwiwalent sferyczny; SF, częstotliwość przestrzenna; VCD, głębokość komory szklistej.

na wpływ środowiska na rozwój krótkowzroczności, podkreślając znaczenie zróżnicowanego kontrastu i częstotliwości przestrzennej.

Chociaż ogólny wpływ tego zjawiska pozostaje przedmiotem trwającej debaty, możliwość wpływu sygnałów chromatycznych na rozwój refrakcji podkreśla potrzebę dalszych badań nad rolą widzenia barw w emmetropizacji (Chakraborty i in., 2019; Rucker, 2019). Przyszłe badania powinny dążyć do włączenia tych wyników do kompleksowych strategii zapobiegania i kontroli krótkowzroczności, koncentrując się na promowaniu zdrowego środowiska wizualnego i nawyków wśród dzieci. Modele zwierzęce oferują kontrolowane warunki do manipulowania bodźcami wzrokowymi i monitorowania wynikających z nich reakcji oczu. Modele te mają kluczowe znaczenie dla wyjaśnienia potencjalnych mechanizmów biologicznych regulujących wzrost oka, zwłaszcza w odpowiedzi na zmienne częstotliwości przestrzenne. Naukowcy mogą badać wpływ na rozwój oka i postęp krótkowzroczności, wystawiając zwierzęta na działanie środowisk o regulowanych częstotliwościach przestrzennych, co dostarcza informacji trudnych do uzyskania wyłącznie w badaniach na ludziach. Jednak ze względu na różnice między gatunkami i złożoność życia ludzkiego wnioski z eksperymentów na zwierzętach nie mogą być wprost przenoszone na ludzi. Dlatego też, aby w pełni zrozumieć złożoną zależność między częstotliwością przestrzenną a krótkowzrocznością, badania epidemiologiczne

Badania i modele zwierzęce są niezbędne do zbadania wzajemnych powiązań między nimi.

3.2 | Badania populacyjne

W porównaniu z eksperymentami na modelach zwierzęcych, badania populacyjne są stosunkowo rzadkie, a większość z nich dotyczy badań na ludziach. Badania epidemiologiczne rozpoczęto w ciągu ostatnich kilku lat, a dorobek naukowy w tej dziedzinie pozostaje dość ograniczony, a badania charakteryzują się małą liczebnością próby. Charakterystykę tych badań populacyjnych przedstawiono w tabeli 2. Wyniki oceny jakości literatury przedstawiono w tabeli S2. Trzy artykuły oceniono jako wysokiej jakości, a jeden jako średniej jakości, co wskazuje na stosunkowo wiarygodny i kompletny zestaw wyników.

Podobnie jak w przypadku eksperymentów na zwierzętach, w badaniach na ludziach również zastosowano kontrolowane warunki, w których manipulowano bodźcami wzrokowymi i monitorowano wynikające z nich reakcje wzrokowe. Analiza elektroretinogramu (ERG) jest powszechnie stosowana w celu potwierdzenia wysokiej wrażliwości siatkówki, zwłaszcza jej obrzeżnych obszarów, na sygnały nieostre, głównie o niższych częstotliwościach przestrzennych (Chin i in., 2015). Wrażliwość ta podkreśla udział siatkówki w regulacji wzrostu oka, co jest istotnym aspektem w zrozumieniu i zapobieganiu

TABELA 2 Charakterystyka badań epidemiologicznych dotyczących związku między częstotliwością przestrzenną a refrakcją.

Autor i data	Badani (wiek)	Wielkość próby	Metoda oceny częstotliwości przestrzennej	Wskaźnik refrakcji	Główne wyniki
Wei i in., 2021	Młodzi dorośli (w wieku 22–26 lat)	17	Siatki z przesunięciem fazowym w dwu wymiarowe okno Gaussa. Częstotliwości przestrzenne: 0,6, 1,2, 2,4 i 4,0 c/d przy 20° ekscentryczności oraz 0,6, 1,2, 2,0 i 3,2 c/d przy 27° ekscentryczności	Ruch obwodowy postrzeganie	Ruch dolny progi wykrywalności były związane z wyższym poziomem krótkowzroczności, szczególnie do wykrywania celów o niskiej częstotliwości przestrzennej i przy 20° pola widzenia pola widzenia
Vera-Diaz et al., 2018	Young osób dorosłych (w wieku 18–31 lat, 24,6± 1,85 lat)	33	Skalowanie obrazu na monitorze do szczytowe częstotliwości przestrzenne 1, 2, 4 i 8 c/deg	Widzenie obuoczne zadanie funkcjonalne	W porównaniu z grupą z emmetropią, grupa z krótkowzrocznością wykazała większy stopień nierównowagi binokularnej przy średnich i wysokich częstotliwościach przestrzennych częstotliwościach
Chin i in., 2015	Young osoby dorosłe (w wieku 21–27 lat, 22,5± 1,6 lat)	46	Różne częstotliwości przestrzenne (0,24, 1,2, 2,4, 4,8 cyklu na cpd)	Elektroretinogram	Obwodowa część siatkówki może rozróżniać pozytywne i ujemne rozogniskowanie bardziej skutecznie dla niskich częstotliwości przestrzennych niż w przypadku centralnej siatkówki
Li i in., 2024	Dzieci (w wieku 5–12 lat; 8,04± 1,47 lat)	566	Ilościowa ocena Uczestnicy częstotliwości przestrzennych poprzez obrazów	SE (cykloplegia refrakcji)	Niższa przestrzeń wewnętrzna częstotliwość była związana z wyższym poziomem krótkowzroczności

Skróty: c/d, cyc/deg.; SE, równoważnik sferyczny.

krótkowzroczność (Chin i in., 2015). Ponadto badania Vera-Diaz FA dotyczące wpływu krótkowzroczności na widzenie obuoczne i przetwarzanie czasowe wykazały, że osoby krótkowzroczne wykazywały większą nierównowagę obuoczną przy średnich i wysokich częstotliwościach przestrzennych w porównaniu z osobami dalekowzrocznymi. Wskazuje to na potencjalne zależne od częstotliwości przestrzennej różnice w wydajności zadań obuocznych między osobami z emmetropią a osobami z krótkowzrocznością, które mogą być związane ze zmianami strukturalnymi podczas emmetropizacji (Vera-Diaz et al., 2018). Postrzeganie ruchu peryferyjnego, jako wskaźnik związany ze stanem refrakcji, ujawnia złożoną zależność między stopniem krótkowzroczności a progami wykrywania ruchu peryferyjnego, co podkreśla wieloaspektowy charakter przetwarzania wzrokowego w tym schorzeniu, wskazując na złożoność i współzależność różnych układów wzrokowych (Wei i in., 2021).

Coraz więcej badań dotyczących związku między częstotliwością przestrzenną a postępem krótkowzroczności podkreśla kluczowy wpływ czynników środowiskowych, zwłaszcza w środowisku miejskim i wewnątrz pomieszczeń (Tolhurst i in., 1992). Badania porównawcze między naturalnymi krajobrazami zewnętrznymi, które charakteryzują się wysoką częstotliwością przestrzenną, a ich sztucznymi odpowiednikami wewnątrz pomieszczeń, często pozbawionymi takiej częstotliwości, stały się przedmiotem intensywnych badań. Flitcroft potwierdził różnicę w częstotliwości przestrzennej między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym, analizując obrazy, i wskazał, że te ustawienia wewnętrzne były podobne do efektu indukcji krótkowzroczności filtra Bangertera, sugerując, że rozbieżność w bodźcach wzrokowych między ustawieniami wewnętrznymi i zewnętrznymi może być potencjalnym czynnikiem ryzyka rozwoju krótkowzroczności (Flitcroft et al., 2020). W ślad za tym pionierska chińska inicjatywa „klasy na świeżym powietrzu” stanowi potwierdzenie tej tezy.

rozumienie, prezentując zachęcające wstępne wyniki w zakresie akceptacji użytkowników i sugerując potencjalną rolę w łagodzeniu postępu krótkowzroczności (Yi i in., 2023). Jednak w ramach tej inicjatywy nie oceniono środowiska, a wyniki dalszych badań nie zostały jeszcze opublikowane. Li i współpracownicy ocenili częstotliwości przestrzenne obrazów środowisk wewnętrznych i zewnętrznych i stwierdzili, że nachylenie częstotliwości przestrzennej środowisk wewnętrznych było znacznie niższe niż zewnętrznych (Li et al., 2024). Zmniejszona zawartość wysokich częstotliwości przestrzennych w pomieszczeniach była skorelowana z wyższym poziomem krótkowzroczności wśród dzieci, dostarczając dowodów epidemiologicznych na wpływ częstotliwości przestrzennej środowiska na krótkowzroczność.

Podsumowując, holistyczne podejście łączące badania na ludziach z modelami zwierzęcymi może otworzyć nowe możliwości w zakresie zapobiegania i leczenia krótkowzroczności. Wykorzystując zalety obu metodologii, możemy uzyskać głębsze zrozumienie roli częstotliwości przestrzennej w regulacji wzrostu oka i opracować ukierunkowane interwencje, takie jak wzbogacanie środowisk wewnętrznych w celu naśladowania naturalnych właściwości przestrzennych środowiska zewnętrznego, poprawa oświetlenia wewnętrznego, a ostatecznie zmniejszenie obciążenia krótkowzrocznością na całym świecie.

3.3 | Potencjalne mechanizmy leżące u podstaw tego zjawiska

3.3.1 | Charakterystyka przetwarzania informacji wizualnych

Przetwarzanie częstotliwości przestrzennej przez siatkówkę można wyjaśnić poprzez rozkład i neurofizjologię

cechy fotoreceptorów i komórek zwojowych w siatkówce. W siatkówce dwa podstawowe typy komórek, komórki X i komórki Y, odgrywają kluczową rolę w przetwarzaniu informacji wzrokowych. Komórki X, zlokalizowane głównie w pobliżu plamki żółtej, wykazują zwiększoną wrażliwość na szczegóły wzrokowe, kolory i statyczne kształty, wykazując silną reakcję na sygnały wzrokowe o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (Chen et al., 2018). Natomiast komórki Y, rozmieszczone głównie na obrzeżach siatkówki, są bardziej wrażliwe na postrzeganie ruchu, głębi i sygnałów wzrokowych o niskich częstotliwościach przestrzennych (Ramanoel et al., 2018). Sygnały przestrzenne o niskiej częstotliwości stymulują głównie ścieżkę komórek Y na obrzeżach siatkówki, co powoduje rozmycie obrazu. Może to wywołać wydłużenie osiowe oka w celu uzyskania wyraźniejszego obrazu, ułatwiając w ten sposób wzrost osiowy i wystąpienie krótkowzroczności (Liou & Chiu, 2001).

Ponadto badania sugerują, że wpływ częstotliwości przestrzennej na regulację wzrostu oka może być pośredniczony przez dopaminę w siatkówce (Feldkaemper i in., 1999; Souza i in., 2017). Aktywacja receptorów dopaminowych D1 hamuje krótkowzroczność, natomiast aktywacja receptorów D2 ją sprzyja. Dopamina w siatkówce utrzymuje prawidłowy rozwój refrakcji poprzez równowagę homeostatyczną utworzoną przez aktywację zarówno receptorów D1, jak i D2. Podczas indukcji krótkowzroczności poziom dopaminy spada. Niektóre badania sugerują, że większe powinowactwo dopaminy do receptorów D2 w porównaniu z receptorami D1 może prowadzić do zmniejszenia aktywacji receptorów D1, co zaburza równowagę homeostatyczną i powoduje krótkowzroczność (Zhou i in., 2017). Receptory dopaminowe D2 modulują selektywność częstotliwości przestrzennej neuronów w układzie wzrokowym. Wykazano, że genetyczne wyeliminowanie receptorów D2 u myszy zwiększa wrażliwość kory wzrokowej V1 na częstotliwość przestrzenną (Souza i in., 2017). Ponadto zmniejszona aktywacja receptorów dopaminowych D1 prowadzi do zwiększonego sprzężenia komórek poziomej i obniżonego progu częstotliwości przestrzennej (Aung i in., 2022).

W tym procesie częstotliwość przestrzenna wpływa również na różnicową aktywację ścieżek wzrokowych ON-OFF (Aung i in., 2022; Pan, 2019). Gdy informacje wzrokowe przemieszczają się z siatkówki przez jądro kolankowe boczne (LGN) do kory wzrokowej, ścieżki ON-OFF w polach receptywnych LGN są wrażliwe na zmiany luminancji. Zmniejszenie stymulacji wzrokowej ścieżki ON i zaburzenie równowagi między ścieżkami ON i OFF może sprzyjać rozwojowi krótkowzroczności (Morgan & Jan, 2022; Poudel et al., 2024). Modele zwierzęce potwierdziły, że dominacja aktywacji ON-OFF jest skorelowana z częstotliwością przestrzenną, przy czym niskie częstotliwości przestrzenne aktywują neurony zdominowane przez ścieżkę OFF pięć razy częściej niż neurony zdominowane przez ścieżkę ON (Jansen et al., 2019; Kremkow et al., 2014).

W procesie tym bierze również udział naczyniówka, która jest niezbędnym przewodnikiem sygnałów z siatkówki do twardówki (Nickla & Wallman, 2010). Po wprowadzeniu sygnałów wzrokowych o niskiej częstotliwości wynikające z tego zmiany w sygnałach wzrokowych siatkówki nie tylko wpływają na ścieżkę pręcików, ale także zmniejszają przepływ krwi w naczyniówce, ostatecznie wywołując krótkowzroczność, co potwierdzono w modelach zwierzęcych (Choi et al., 2022). Odkrycia te podkreślają złożoną interakcję między

częstotliwością przestrzenną, fizjologią siatkówki i rozwojem krótkowzroczności, oferując wgląd w potencjalne cele terapeutyczne w zakresie zapobiegania krótkowzroczności i zarządzania nią.

3.3.2 | Funkcja akomodacji oka i ruchy gałki ocznej

Obecność sygnałów akomodacyjnych jest ważna dla kierowania odpowiednimi dostosowaniami wzrostu, co podkreśla potrzebę wykonywania zadań wzrokowych angażujących układ akomodacyjny (Logan et al., 2021). Podkreśla to potencjalne korzyści wynikające z włączenia czynności wykonywanych z bliska, z odpowiednimi przerwami i patrzeniem na odległość, do codziennych czynności dzieci (Diether & Wildsoet, 2005; Logan et al., 2021). Badania wykazały, że wraz ze wzrostem częstotliwości przestrzennej wzrasta również reakcja akomodacyjna oka. Podczas pojawienia się i postępu krótkowzroczności opóźnienie akomodacyjne staje się istotnym czynnikiem wywołującym. W konsekwencji niskie częstotliwości przestrzenne występujące w środowiskach wewnętrznych są bardziej prawdopodobną przyczyną opóźnienia akomodacyjnego i zmniejszonych fluktuacji akomodacyjnych, co sprzyja rozwojowi i postępowi krótkowzroczności (Allen i in., 2010).

Groner i wsp. zbadali dalej wpływ składowych częstotliwości przestrzennej na parametry okulomotoryczne i odkryli korelację między zawartością częstotliwości przestrzennej a średnim czasem trwania fiksacji, przy czym wyższe częstotliwości przestrzenne powodowały dłuższy czas trwania fiksacji (Groner i wsp., 2008). Oprócz czasu trwania fiksacji częstotliwość przestrzenna wpływa również na amplitudę sakkad. Stymulacja sygnałami o niskiej częstotliwości przestrzennej powoduje zazwyczaj wzrost amplitudy sakkad, umożliwiając układowi wzrokowemu analizę informacji z bardziej odległych peryferyjnych pól widzenia, co powoduje większe sakkady. Wyniki te sugerują, że częstotliwość przestrzenna wywiera modulujący wpływ zarówno na ruchy gałek ocznych, jak i funkcję akomodacyjną (Groner i in., 2008). Xu i wsp., analizując charakterystykę częstotliwości przestrzennej zdolności akomodacyjnej u dzieci z różnymi stanami refrakcji, odkryli ponadto, że niestabilność funkcji akomodacyjnej u dzieci jest zależna od częstotliwości przestrzennej. W szczególności, w porównaniu z dziećmi z emmetropią, dzieci z krótkowzrocznością były mniej wrażliwe na rozmycie spowodowane niskim kontrastem przy wysokich częstotliwościach przestrzennych (Xu i wsp., 2019).

(Radhakrishnan i in., 2004; Tran i in., 2008). CSF, miara wrażliwości wzrokowej na określone bodźce wąskopasmowe w różnych częstotliwościach przestrzennych, umożliwia identyfikację i zrozumienie drobnych szczegółów w rzeczywistym środowisku wizualnym (Arden, 1978).

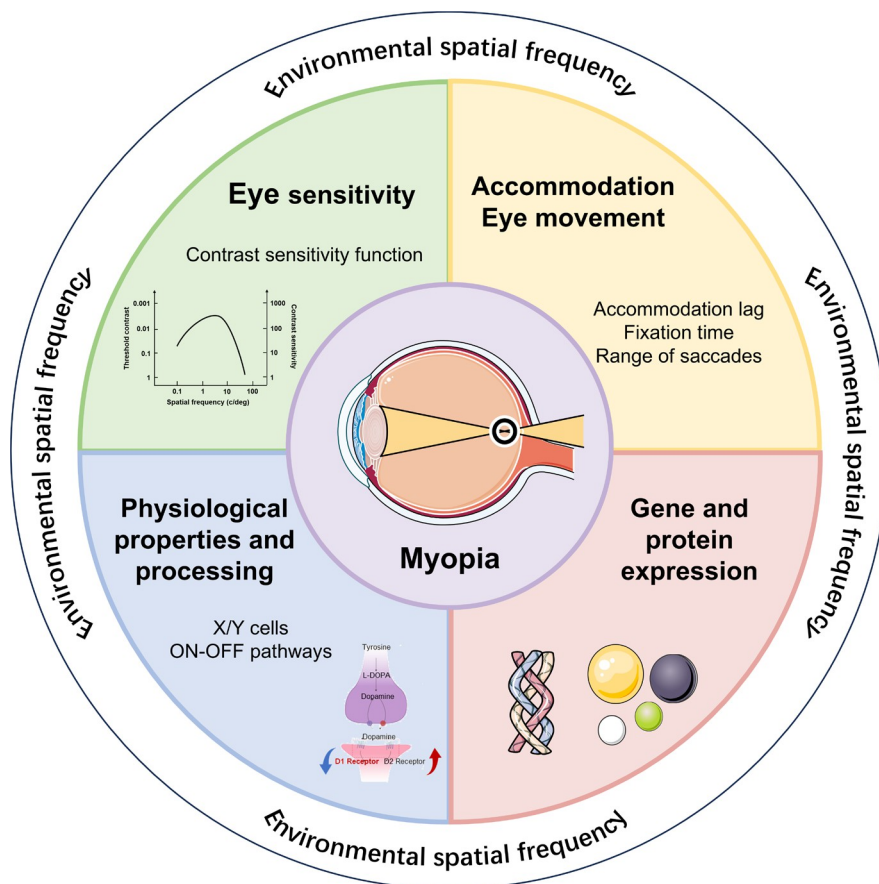
Brak informacji wizualnych o wysokiej częstotliwości może prowadzić do zmniejszenia wrażliwości na kontrast, co z kolei może przyczyniać się do wystąpienia krótkowzroczności. Dotychczasowe badania potwierdziły, że im wyższy stopień krótkowzroczności, tym niższa wrażliwość na kontrast (Huang i in., 2007; Ye i in., 2023). Wraz ze wzrostem częstotliwości przestrzennej sygnałów wzrokowych, degradujący wpływ rozmycia spowodowanego nieostrością na kontrast obrazu siatkówki staje się bardziej wyraźny, co wskazuje na większą wrażliwość oka na zmiany kontrastu w sygnałach o wyższej częstotliwości (Marcos i in., 1999a).

W porównaniu z osobami o normalnym wzroku, osoby krótkowzroczne wykazują zmniejszoną wrażliwość na rozmycie spowodowane nieostrością, prawdopodobnie z powodu zmniejszonej aktywacji siatkówki przez niskie częstotliwości przestrzenne (Taylor i in., 2009). Odkrycia te podkreślają złożony związek między wrażliwością na kontrast, częstotliwością przestrzenną i krótkowzrocznością. Sugerują one, że interwencje mające na celu zwiększenie wrażliwości na kontrast, szczególnie przy wysokich częstotliwościach przestrzennych, mogą być skuteczne w zmniejszaniu ryzyka rozwoju i postępu krótkowzroczności. Ponadto zaobserwowane różnice w wrażliwości na rozmycie spowodowane nieostrością widzenia między osobami krótkowzrocznymi i nie krótkowzrocznymi podkreślają znaczenie uwzględnienia indywidualnych cech wzroku przy projektowaniu środowisk wizualnych i strategii korekcyjnych.

3.3.4 | Odpowiednie cząsteczki biorące udział w tym procesie

U kręgowców gen Sonic hedgehog (Shh) odgrywa kluczową rolę w różnicowaniu komórek zwojowych siatkówki, fotoreceptorów i barwnikowego nabłonka siatkówki. Wykazano, że indukuje on krótkowzroczność poprzez zwiększenie ekspresji metaloproteinazy macierzy (MMP) 2 (Amato i in., 2004; Chen i in., 2014). Qian i wsp. stworzyli myszy model krótkowzroczności spowodowanej pozbawieniem formy i odkryli, że zmniejszenie częstotliwości przestrzennej informacji wizualnej za pomocą dyfuzorów zakłóciło szlak sygnałowy Shh, prowadząc do wydłużenia osiowego i wystąpienia krótkowzroczności (Qian i wsp., 2009). Oprócz ekspresji Shh, Brand i wsp. zaobserwowali w swoim modelu mysim, że usunięcie informacji wzrokowej o wysokiej częstotliwości zmniejszało poziom mRNA i białka Early growth response 1 (Egr-1) w siatkówce, co powodowało nieprawidłowości w rozwoju refrakcji i rozwój krótkowzroczności (Brand i wsp., 2005, 2007).

Ponadto badania podkreśliły kluczową rolę koneksyn wzrokowych w funkcjach wzrokowych, takich jak wrażliwość na kontrast, widzenie skotopowe i regulacja ostrości wzroku przy różnych natężeniach światła (Vaney, 2002). W modelu świnki morskiej odkryto, że koneksyny wzrokowe uczestniczą również w procesie krótkowzroczności wywołanej deprywacją częstotliwości przestrzennej. Deprywacja ta wpływa na rozwój krótkowzroczności poprzez modulowanie fosforylacji koneksyny siatkówkowej 36 (Cx36), wpływając w ten sposób na szlak sygnałowy przecików i ostatecznie wywołując krótkowzroczność (Shi i in., 2020).



RYSUNEK 2 Podstawowe mechanizmy u częstotliwości przestrzennej w krótkowzroczności.

Chociaż modele zwierzęce wykazują, że zmniejszona częstotliwość przestrzenna przyczynia się do krótkowzroczności, nie jest to jedyny czynnik. Dlatego konieczne są dalsze badania w celu zbadania konkretnych genów i ekspresji białek, które pośredniczą w związku między częstotliwością przestrzenną a wystąpieniem krótkowzroczności. Ponadto badania walidacyjne w populacjach ludzkich są niezbędne do potwierdzenia tych wyników i uzyskania bardziej kompleksowego zrozumienia podstawowych mechanizmów.

Podsumowując, mechanizmy częstotliwości przestrzennej środowiska i jej możliwy związek z krótkowzrocznością zostały kompleksowo podsumowane na rysunku 2. Rysunek 2 podsumowuje cztery odrębne, ale powiązane ze sobą ścieżki mające wpływ na występowanie i rozwój krótkowzroczności. Zakłada się, że wzajemne oddziaływanie tych czynników leży u podstaw złożonej dynamiki wystąpienia i postępu krótkowzroczności.

4 | WNIOSKI I PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

Wydaje się, że częstotliwość przestrzenna środowiska odgrywa ważną rolę w rozwoju krótkowzroczności. Nasze zrozumienie biologicznych mechanizmów leżących u podstaw modulacji krótkowzroczności przez częstotliwość przestrzenną otwiera obiecujące możliwości rozwoju innowacyjnych metod interwencji, choć konieczne są dalsze badania. Kluczem do złagodzenia obciążenia związanego z krótkowzrocznością może być wielopłaszczyznowe podejście, łączące modyfikacje środowiska, zmiany zachowań i potencjalne interwencje genetyczne.

Z punktu widzenia zdrowia publicznego promowanie projektowania środowisk bogatych wizualnie, szczególnie dla dzieci i młodzieży, może stanowić potencjalną strategię profilaktyczną, obok zwiększenia czasu spędzanego na świeżym powietrzu, co jest sprawą najwyższej wagi. Obejmuje to włączenie elementów, które zwiększają dostępność wysokich częstotliwości przestrzennych zarówno w pomieszczeniach, jak i na zewnątrz, naśladując w ten sposób ochronne działanie naturalnych scen na świeżym powietrzu. Strategie takie jak wprowadzenie bodźców wizualnych modulowanych częstotliwością przestrzenną w szkołach, domach i miejscach pracy mogą stanowić skuteczne środki ograniczające rosnącą tendencję do krótkowzroczności.

Ponadto interakcja innych czynników wizualnych, takich jak oświetlenie i widmo, z częstotliwością przestrzenną zasługuje na dalsze badania, ponieważ mogą one dostarczyć dodatkowych informacji na temat modulacji rozwoju refrakcji. Aby zapewnić solidne dowody na możliwość wdrożenia tych interwencji na większą skalę, konieczne są badania interwencyjne oparte na populacji, mające na celu systematyczną ocenę skuteczności tych interwencji.

Ostatecznie, wykorzystując wiedzę zdobytą dzięki modelom zwierzęcym i badaniom na ludziach, możemy opracować dostosowane do potrzeb interwencje, które nie tylko rozwiązują bezpośrednie problemy związane z krótkowzrocznością, ale także przyczyniają się do długoterminowego zdrowia wzroku i dobrego samopoczucia osób na całym świecie. Znaczenie tych wysiłków wykracza poza dziedzinę okulistyki, podkreślając głębokie implikacje dla zdrowia publicznego i ogólnej jakości życia. Rozpoczynając tę podróż, priorytetowe znaczenie ma poszukiwanie kompleksowych strategii zapobiegania i kontroli krótkowzroczności, które mogą

znacznie zmniejszyć globalne obciążenie związane z tą powszechną chorobą oczu.

AUTORSKIE WKŁADY

Koncepcja i projekt: Chen-Wei Pan, Dan-Lin Li. Analiza i interpretacja: Dan-Lin Li. Gromadzenie danych: Dan-Lin Li. Opracowanie manuskryptu: Dan-Lin Li. Krytyczna weryfikacja manuskryptu: Carla Lanca, Xiu-Juan Zhang, Andrzej Grzybowski, Xian-Gui He, Chen-Wei Pan. Ogólna odpowiedzialność: Chen-Wei Pan.

INFORMACJE FINANSOWE

Badania zostały sfinansowane w ramach chińskiego programu badań i rozwoju (2024YFC2510800 i 2024YFC2510801). Sponsor lub organizacja finansująca nie mieli wpływu na projekt ani przebieg badań.

OŚWIADCZENIE O KONFLIKCIE INTERESÓW

Żaden z autorów nie ma konfliktu interesów, który należałoby ujawnić.

ORCID

Dan-Lin Li  <https://orcid.org/0000-0003-0800-4308>

Andrzej Grzybowski  <https://orcid.org/0000-0002-3724-2391>

Xian-Gui He 

Chen-Wei Pan 

REFERENCJE

- Allen, P.M., Hussain, A., Usherwood, C. & Wilkins, A.J. (2010) Pattern-related visual stress, chromaticity, and accommodation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51, 6843–6849.
- Amato, M.A., Boy, S. & Perron, M. (2004) Sygnalizacja Hedgehog w rozwoju oka kręgowców: rosnąca zagadka. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 61, 899–910.
- Arden, G.B. (1978) Znaczenie pomiaru wrażliwości na kontrast w przypadkach zaburzeń widzenia. *The British Journal of Ophthalmology*, 62, 198–209.
- Aung, M.H., Hogan, K., Mazade, R.E., Park, H.N., Sidhu, C.S., Iuvone, P.M. i in. (2022) Zakłócenie ścieżki ON niż OFF prowadzi do większych deficytów funkcji wzrokowej i sygnalizacji dopaminowej w siatkówce. *Experimental Eye Research*, 220, 109091.
- <

- metaloпротеиназы матрицы (MMP)-2 у свинок морских. *PLoS One*, 9, e96952.
- Chin, M.P., Chu, P.H., Cheong, A.M. & Chan, H.H. (2015) Ludzkie reakcje elektroretinograficzne na wzory siatki i zmiany defokusa za pomocą globalnego wieloogniskowego elektroretinogramu błyskowego. *PLoS One*, 10, e0123480.
- Choi, K.Y., Chan, S.S. & Chan, H.H. (2022) Wpływ czynników ryzyka śródowniskowego związanych z przestrzenią w scenach wizualnych na krótkowzroczność. *Clinical & Experimental Optometry*, 105, 353–361.
- Day, M., Gray, L.S., Seidel, D. & Strang, N.C. (2009) Związek między profilem przestrzennym obiektu a mikrofluktuacjami akomodacji u osób z emmetropią i krótkowzrocznością. *Journal of Vision*, 9, 5.1–5.13.
- Diether, S. i Wildsoet, C.F. (2005) Wymagania bodźcowe dla dekodowania defokusa krótkowzrocznego i dalekowzrocznego w warunkach pojedynczego i konkurencyjnego defokusa u kurcząt. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46, 2242–2252.
- Dolgin, E. (2015) Boom na krótkowzroczność. *Nature*, 519, 276–278.
- Feldkaemper, M., Diether, S., Kleine, G. i Schaeffel, F. (1999) Interakcje informacji przestrzennych i luminancji w siatkówce kurcząt podczas rozwoju krótkowzroczności. *Experimental Eye Research*, 68, 105–115.
- Fisher, M., Feuerstein, G., Howells, D.W., Hurn, P.D., Kent, T.A., Savitz, S.I. i in. (2009) Aktualizacja przedklinicznych zaleceń akademicko-przemysłowego okrągłego stołu ds. terapii udaru mózgu. *Stroke*, 40, 2244–2250.
- Flitcroft, D.I., Harb, E.N. & Wildsoet, C.F. (2020) Zawartość częstotliwości przestrzennej w środowiskach miejskich i wewnętrznych jako potencjalny czynnik ryzyka rozwoju krótkowzroczności. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 61, 42.
- Flitcroft, D.I., He, M., Jonas, J.B., Jong, M., Naidoo, K., Ohno-Matsui, K. i in. (2019) IMI – definiowanie i klasyfikacja krótkowzroczności: proponowany zestaw standardów dla badań klinicznych i epidemiologicznych. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 60, M20–M30.
- Fricke, T.R., Sankaridurg, P., Naduvilath, T., Resnikoff, S., Tahhan, N., He, M. i in. (2023) Ustanowienie metody szacowania wpływu opcji leczenia krótkowzroczności na koszty związane z krótkowzrocznością w ciągu całego życia. *The British Journal of Ophthalmology*, 107, 1043–1050.
- Groner, M.T., Groner, R. & von Muhlen, A. (2008) Wpływ częstotliwości przestrzennej na parametry ruchów gałki ocznej. *Psychological Research*, 72, 601–608.
- Hess, R.F., Schmid, K.L., Dumoulin, S.O., Field, D.J. & Brinkworth, D.R. (2006) Jakie właściwości obrazu regulują wzrost oka? *Current Biology*, 16, 687–691.
- Holden, B.A., Fricke, T.R., Wilson, D.A., Jong, M., Naidoo, K.S., Sankaridurg, P. i in. (2016) Globalna częstość występowania krótkowzroczności i wysokiej krótkowzroczności oraz trendy czasowe w latach 2000–2050. *Ophthalmology*, 123, 1036–1042.
- Huang, C., Tao, L., Zhou, Y. i Lu, Z.L. (2007) Pacjenci z niedowidzeniem po leczeniu nadal mają zaburzenia widzenia przestrzennego: badanie wrażliwości na kontrast i hałas zewnętrzny. *Vision Research*, 47, 22–34.
- Jansen, M., Jin, J., Li, X., Lashgari, R., Kremkow, J., Bereshpolova, Y. i in. (2019) Równowaga korowa między reakcjami wzrokowymi ON i OFF jest modulowana przez właściwości przestrzenne bodźca wzrokowego. *Cerebral Cortex*, 29, 336–355.
- Jonas, J.B., Ang, M., Cho, P., Guggenheim, J.A., He, M.G., Jong, M. i in. (2021) Zapobieganie krótkowzroczności i jej postępowi za pomocą IMI. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 62, 6.
- Kauffmann, L., Ramanoel, S., Guyader, N., Chauvin, A. i Peyrin, C. (2015) Przetwarzanie częstotliwości przestrzennej w obszarach kory mózgowej odpowiedzialnych za selektywność scen. *NeuroImage*, 112, 86–95.
- Kerber, K.L., Thorn, F., Bex, P.J. i Vera-Diaz, F.A. (2016) Czulość na kontrast peryferyjny i uwaga w krótkowzroczności. *Vision Research*, 125, 49–54.
- Kihara, K. & Takeda, Y. (2010) Przebieg czasowy integracji informacji opartej na częstotliwości przestrzennej w naturalnych scenach. *Vision Research*, 50, 2158–2162.
- Kremkow, J., Jin, J., Komban, S.J., Wang, Y., Lashgari, R., Li, X. i in. (2014) Nieliniowość neuronów wyjaśnia większą rozdzielczość przestrzenną widzenia w przypadku ciemnych obiektów niż jasnych. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 3170–3175.
- L, R. i K, K. (1990) *Widzenie przestrzenne*. Nowy Jork: Oxford University Press, str. 87–96.
- Li, D.L., Dong, X.X., Yang, J.L., Lanca, C., Grzybowski, A. & Pan, C.W. (2024) Niższa częstotliwość przestrzenna w pomieszczeniach zwiększa ryzyko krótkowzroczności u dzieci. *British Journal of Ophthalmology*, bjo-2024-325888.
- Liou, S.W. & Chiu, C.J. (2001) Krótkowzroczność a wrażliwość na kontrast. *Current Eye Research*, 22, 81–84.
- Logan, N.S., Radhakrishnan, H., Cruickshank, F.E., Allen, P.M., Bandela, P.K., Davies, L.N. i in. (2021) Akomodacja IMI i widzenie obuocznego w rozwoju i postępie krótkowzroczności. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 62, 4.
- Ma, Y., Wen, Y., Zhong, H., Lin, S., Liang, L., Yang, Y. i in. (2022) Wykorzystanie opieki zdrowotnej i obciążenie ekonomiczne związane z krótkowzrocznością w miejskich obszarach Chin: ogólnokrajowe badanie kosztów choroby. *Journal of Global Health*, 12, 11003.
- Maiello, G., Walker, L., Bex, P.J. & Vera-Diaz, F.A. (2017) Postrzeganie rozmycia w całym polu widzenia w przypadku krótkowzroczności i emmetropii. *Journal of Vision*, 17, 3.
- Marcos, S., Moreno, E. i Navarro, R. (1999a) Głębia ostrości ludzkiego oka na podstawie obiektywnych i subiektywnych pomiarów. *Vision Research*, 39,

- Sun, H.P., Li, A., Xu, Y. & Pan, C.W. (2015) Długoterminowe trendy spadku ostrości wzroku w latach 1985–2010 oraz prognozy dotyczące obciążenia chorobowego na lata 2020 i 2030 wśród uczniów szkół podstawowych i średnich w Chinach. *Jama Ophthalmol*, 133, 262–268.
- Taylor, J., Charman, W.N., O'Donnell, C. i Radhakrishnan, H. (2009) Wpływ częstotliwości przestrzennej celu na reakcję akomodacyjną u osób z krótkowzrocznością i emmetropią. *Journal of Vision*, 9, 1–14.
- Tolhurst, D.J., Tadmor, Y. & Chao, T. (1992) Widmo amplitudowe obrazów naturalnych. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 12, 229–232.
- Tran, N., Chiu, S., Tian, Y. & Wildsoet, C.F. (2008) Znaczenie kontrastu obrazu siatkówki i składu częstotliwości przestrzennej dla modulacji wzrostu oka u młodych piskląt. *Vision Research*, 48, 1655–1662.
- Vaney, D.I. (2002) Neurony siatkówki: typy komórek i połączone sieci. *Postępy w badaniach nad mózgiem*, 136, 239–254.
- Vera-Diaz, F.A., Bex, P.J., Ferreira, A. & Kosovicheva, A. (2018) Binocular temporal visual processing in myopia. *Journal of Vision*, 18, 17.
- Wei, J., Kong, D., Yu, X., Wei, L., Xiong, Y., Yang, A. i in. (2021) Czy krótkowzroczność wpływa na wykrywanie ruchu peryferyjnego? *Frontiers in Neuroscience*, 15, 683153.
- Xu, J., Lu, X., Zheng, Z., Bao, J., Singh, N., Drobe, B. i in. (2019) Wpływ częstotliwości przestrzennej na reakcje akomodacyjne chińskich dzieci z krótkowzrocznością i emmetropią. *Translational Vision Science & Technology*, 8, 65.
- Ye, Y., Xian, Y., Liu, F., Lu, Z.L., Zhou, X. & Zhao, J. (2023) Charakterystyka i powiązane parametry funkcji szybkiej wrażliwości na kontrast u chińskich dzieci z ametropią. *Eye & Contact Lens*, 49, 224–233.
- Yi, X., Wen, L., Gong, Y., Zhe, Y., Luo, Z., Pan, W. i in. (2023) Sale lekcyjne na świeżym powietrzu jako sposób na powstrzymanie krótkowzroczności: projekt i podstawowe cechy. *Optometry and Vision Science*, 100, 543–549.
- Zhang, P. i Zhu, H. (2022) Sygnalizacja świetlna a rozwój krótkowzroczności: przegląd. *Okulistyka i terapia*, 11, 939–957.
- Zhi, Z., Pan, M., Xie, R., Xiong, S., Zhou, X. i Qu, J. (2013) Wpływ bodźców czasowych i przestrzennych na stan refrakcji świnek morskich po naturalnej emmetropizacji. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 54, 890–897.
- Zhou, X., Pardue, M.T., Iuvone, P.M. & Qu, J. (2017) Sygnalizacja dopaminowa a rozwój krótkowzroczności: jakie są kluczowe wyzwania. *Postępy w badaniach nad siatkówką i okiem*, 61, 60–71.

INFORMACJE POMOCNICZE

Dodatkowe informacje pomocnicze można znaleźć w Internecie w sekcji Informacje pomocnicze na końcu niniejszego artykułu.

Jak cytować ten artykuł: Li, D.-L., Lanca, C., Zhang, X.-J., Grzybowski, A., He, X.-G. & Pan, C.-W. (2025) Częstotliwość przestrzenna otoczenia a krótkowzroczność: systematyczny przegląd powiązanych dowodów i mechanizmów leżących u podstaw tego zjawiska. *Acta Ophthalmologica*, 00, 1–10. Dostępne na stronie: <https://doi.org/10.1111/aos.17437>