

Neuroekonomia i zapobieganie krótkowzroczności: ramy interwencji w zakresie zdrowia publicznego

Dan-Lin Li¹ | Ting-Han Guo¹ | Andrzej Grzybowski^{2,3} | Chen-Wei Pan¹

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

² Instytut Badań Okulistycznych, Fundacja Rozwoju Okulistyki, Poznań, Polska

³ Katedra Okulistyki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, Polska

Korespondencja

Andrzej Grzybowski, Dyrektor Instytutu Badań Okulistycznych, Fundacja Rozwoju Okulistyki, ul. Mickiewicza 24/3B, 60-836 Poznań, Polska.
E-mail: ae.grzybowski@gmail.com

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

Informacje o finansowaniu

Chińska Narodowa Fundacja Nauk Przyrodniczych, numer grantu/nagrody: 82504435; Projekt planowania naukowego i technologicznego w Suzhou, numer dotacji/nagrody: SYW2025191

Streszczenie

Ma na celu nakreślenie zastosowania neuroekonomii w profilaktyce krótkowzroczności u dzieci, oferując ramy dla projektowania interwencji w zakresie zdrowia publicznego, które są ukierunkowane na mechanizmy podejmowania decyzji, takie jak wybory międzyokresowe, preferencje społeczne i regulacja neurohormonalna. Zsyntetyzowaliśmy teorie i dowody empiryczne z zakresu neuroekonomii, psychologii i neuronauki. W celu oceny wpływu interwencji na procesy neurokognitywne zastosowano podejście multimodalne, obejmujące zadania behawioralne (np. dyskutowanie opóźnień, gra Ultimatum), funkcjonalną spektroskopię w bliskiej podczerwieni (fNIRS), pupilometrię i badania śliny. Badania neuroekonomiczne pokazują, że zachowania związane z krótkowzrocznością wiążą się z konkurencją neuronową między systemami impulsywnymi i regulacyjnymi, dyskutowaniem przyszłych nagród w czasie oraz modulacją przez normy społeczne i neurohormony (np. dopaminę, oksytocynę). Strategie interwencyjne obejmujące natychmiastowe zachęty, informacje zwrotne dotyczące norm społecznych, bodźce środowiskowe i zmniejszenie wysiłku poznawczego wykazują potencjał w promowaniu spędzania czasu na świeżym powietrzu i zmiany zachowań. Neuroekonomia zapewnia nowatorskie ramy dla zapobiegania krótkowzroczności poprzez ukierunkowanie na mechanizmy obliczeniowe neuronów. Przyszłe badania powinny koncentrować się na walidacji międzykulturowej i rozwojowej, jednocześnie zajmując się wyzwaniami etycznymi i wdrożeniowymi, aby rozwijać precyzyjne i sprawiedliwe strategie zdrowia publicznego.

SŁOWA KLUCZOWE

krótkowzroczność, neuroekonomia, profilaktyka

1 | WPROWADZENIE

Globalny wzrost częstości występowania krótkowzroczności u dzieci (myopia) stał się poważnym wyzwaniem dla zdrowia publicznego w XXI wieku, szczególnie w Azji Wschodniej, gdzie częstość występowania tej wady wzroku wśród nastolatków często przekracza 80% (Han i in., 2025; Holden i in., 2016; Morgan i in., 2018). Tendencja ta, coraz częściej obserwowana w Europie i Ameryce Północnej, zapowiada znaczne obciążenie w przyszłości powikłaniami zagrażającymi wzrokowi, w tym zwyrodnieniem plamki żółtej spowodowanym krótkowzrocznością, odwarstwieniem siatkówki, jaskrą i zaćmą, zwiększając tym samym ryzyko nieodwracalnego pogorszenia wzroku i ślepoty w wieku dorosłym (Bullimore & Brennan, 2019; Haarman et al., 2020). Chociaż predyspozycje genetyczne odgrywają pewną rolę, szybki wzrost częstości występowania krótkowzroczności przypisuje się głównie czynnikom środowiskowym i behawioralnym (Biswas i in., 2024; Li i in., 2025). Najważniejsze z nich to długotrwałe wykonywanie czynności wymagających widzenia z bliska, obejmujące zadania wymagające ciągłej akomodacji i konwergencji oczu przy

krótkich odległościach, takich jak czytanie, pisanie i korzystanie z ekranów cyfrowych (np. smartfonów, tabletów, komputerów) (Huang i in., 2015; Sherwin i in., 2012). Ponadto szeroko zakrojone badania epidemiologiczne i kliniczne konsekwentnie wykazały, że wydłużenie czasu spędzanego na świeżym powietrzu, przekraczające około 2 godziny dziennie, wywiera silny wpływ ochronny przed wystąpieniem i postępem krótkowzroczności, a efekt ten jest częściowo pośredniczony przez wywołane światłem uwalnianie dopaminy w siatkówce (Karouta i in., 2025; Martinez-Perez i in., 2025; Parssinen, 2025).

W związku z tym podstawą współczesnych strategii zdrowia publicznego w zakresie zapobiegania krótkowzroczności jest zmiana zachowań: promowanie aktywności na świeżym powietrzu i zarządzanie zachowaniami związanymi z pracą w bliskiej odległości (Flitcroft i in., 2019; Pan i in., 2025). Chociaż niektóre interwencje optyczne również wykazały skuteczność w opóźnianiu wystąpienia krótkowzroczności u dzieci przedkrótkowzrocznych w badaniach z randomizacją (Wang i in., 2025), głównym celem zdrowia publicznego pozostaje zachowanie. Jednak przełożenie tej wiedzy na skuteczne interwencje na dużą skalę jest

okazało się niezwykle trudne. Tradycyjne kampanie informacyjne dotyczące zdrowia, oparte na rozpowszechnianiu wiedzy o długoterminowych zagrożeniach, konsekwentnie przynosiły rozczerwające wyniki w zakresie zmiany nawykowych zachowań (Janz & Becker, 1984; Webb & Sheeran, 2006). Ta porażka podkreśla fundamentalny paradoks: dlaczego dzieci i ich opiekunowie, pomimo świadomości potencjalnych przyszłych konsekwencji, uparczywie angażują się w zachowania, które zagrażają długoterminowemu zdrowiu wzroku? Odpowiedź leży w samej naturze procesów decyzyjnych. Korzyści płynące z przestrzegania zasad, rezygnacji z natychmiastowej rozrywki przed ekranem na rzecz zabawy na świeżym powietrzu lub utrzymania prawidłowej postawy podczas czytania, są odległe i prawdopodobne, podczas gdy koszty (postrzegane lub rzeczywiste), takie jak utrata natychmiastowej gratyfikacji, izolacja społeczna lub wysiłek związany z samokontrolą, są natychmiastowe i wyraźne (Claus et al., 2011; Scholten & Read, 2010). Napięcie to stanowi klasyczny konflikt międzyczasowy, w którym decyzje podejmowane są między mniejszymi, ale szybszymi korzyściami (czas spędzany przed ekranem) a większymi, ale późniejszymi korzyściami (zachowanie wzroku) (Hayden, 2016).

W tym miejscu nowa, przełomowa dziedzina neuroekonomii oferuje nowatorskie i potężne ramy wyjaśniające oraz zestaw narzędzi. Neuroekonomia, będąca interdyscyplinarną fuzją ekonomii, psychologii i neuronauki, ma na celu odkrycie mechanizmów neurobiologicznych leżących u podstaw podejmowania decyzji, szczególnie w sytuacjach związanych z ryzykiem, nagrodą, niepewnością i interakcją strategiczną (Hsu et al., 2008). Wykracza ona poza tradycyjny model ekonomiczny idealnie racjonalnego podmiotu i zamiast tego zapewnia oparte na biologii zrozumienie tego, w jaki sposób poznawcze i afektywne systemy neuronowe konkurują ze sobą i integrują się, aby dokonywać rzeczywistych wyborów (Rangel et al., 2008). Podstawowym założeniem niniejszego przeglądu jest to, że wyzwania związane z profilaktyką krótkowzroczności u dzieci nie mają charakteru wyłącznie edukacyjnego lub motywacyjnego w sensie ogólnym, ale są zasadniczo zakorzenione w neurokomputerowych procesach oceny i wyboru. Dlatego też pokonanie tych wyzwań wymaga interwencji, które są wyraźnie zaprojektowane tak, aby oddziaływać na te głęboko zakorzenione mechanizmy neuronowe.

Neuroekonomia dostarcza kluczowych pojęć, które mają bezpośrednie zastosowanie w dylemacie zapobiegania krótkowzroczności (Tabela 1). Na przykład teoria podwójnego systemu podejmowania decyzji zakłada, że wybory wynikają z interakcji między impulsywnym, afektywnym systemem (związanym z obszarami limbicznymi i prążkowia, takimi jak ciało migdałowate i

prążkowie brzuszne), który priorytetowo traktuje natychmiastowe nagrody, oraz refleksyjny system kontroli poznawczej (związany z korą przedczołową, zwłaszcza z obszarami grzbietowo-bocznymi i przednio-przyśrodkowymi), który wspiera długoterminowe planowanie i samoregulację (Hare i in., 2009; McClure i in., 2004). W kontekście krótkowzroczności siedzący tryb pracy z bliska często zapewnia silną, natychmiastową stymulację systemu impulsywnego, podczas gdy system refleksyjny, który wciąż rozwija się w okresie dzieciństwa i dorastania, może być zbyt słaby lub obciążony zbyt dużym obciążeniem poznawczym, aby konsekwentnie przeważać nad tymi impulsami (Casey & Caudle, 2013). Ponadto pojęcia takie jak dyskontowanie czasu – dewaluacja przyszłych nagród w stosunku do natychmiastowych – wyjaśniają, dlaczego abstrakcyjna przyszła korzyść wynikająca ze zdrowego wzroku jest często przeważana przez konkretną terażniejszą korzyść wynikającą z gry wideo (Kable & Glimcher, 2007). Preferencje społeczne, takie jak niechęć do nierówności i konformizm, w których pośredniczą obszary mózgu, takie jak wyspa i przednia kora zakrętu obręczy, pomagają wyjaśnić, w jaki sposób presja rówieśników i normy społeczne mogą silnie wpływać na decyzję dziecka o zabawie w domu lub na świeżym powietrzu (Fehr & Camerer, 2007; Sanfey et al., 2003). Wreszcie, badania nad neurohormonami, takimi jak oksytocyna (związana z zaufaniem i więziami społecznymi) i dopamina (kluczowa dla przewidywania nagród i uczenia się przez wzmocnienie), dostarczają informacji na temat tego, w jaki sposób interwencje społeczne i struktury motywacyjne mogą być zoptymalizowane pod kątem biologicznym, aby zachęcać do zachowań ochronnych (Schultz, 2002; Zak i in., 2005).

Celem niniejszego przeglądu jest systematyczne wypełnienie tej luki teoretycznej. Proponujemy nowatorskie ramy stosowania zasad neuroekonomii w projektowaniu interwencji w zakresie zdrowia publicznego, mających na celu ograniczenie epidemii krótkowzroczności wśród dzieci. Chociaż niniejszy przegląd proponuje ramy teoretyczne, a bezpośrednio dowody na jego skuteczność w zapobieganiu krótkowzroczności wciąż się pojawiają, opiera się on na solidnych wynikach badań empirycznych z zakresu ekonomii behawioralnej, które pokazują, że ukierunkowane zachęty mogą modyfikować zachowania zdrowotne (Volpp et al., 2011), oraz z zakresu okulistyki, potwierdzających ochronną rolę czasu spędzanego na świeżym powietrzu w zapobieganiu wystąpieniu i postępowi krótkowzroczności (He et al., 2015). Będziemy argumentować, że skuteczne interwencje muszą wykraczać poza zwykle dostarczanie informacji i zamiast tego być strategicznie zaprojektowane tak, aby skalibrować neurokomputerowe sygnały wartości, które kierują zachowaniem. Oznacza to projektowanie zachęty, które sprawiają, że zdrowe wybory stają się bardziej widoczne i

TABELA 1 Podsumowanie strategii interwencyjnych opartych na neuroekonomii w zapobieganiu krótkowzroczności.

Strategia interwencyjna	Cel neuroekonomiczny	Przykład zastosowania	Mierzalny wynik (behawioralny/neuralny)
Natychmiastowe zachęty (Kable & Glimcher, 2007)	Dyskontowanie czasowe; dopamina	System tokenowy za czas spędzony na świeżym powietrzu (np. punkty wymienne na nagrody)	↑ Czas spędzony na świeżym powietrzu (dane GPS); ↑ Aktywacja VS (fNIRS)
Wyzwania społeczne w grupie (Falk & Bassett, 2017; Fehr & Camerer, 2007)	Preferencje społeczne; oksytocyna	Konkurs obejmujący całą szkołę z publicznymi tabelami wyników	↑ Czas spędzany wspólnie na świeżym powietrzu; ↑ Samodzielnie zgłaszana przyjemność
Domyślne bodźce (Schultz i in., 1997; Zak i in., 2005)	Obciążenie poznawcze; funkcja LPFC	Automatyczne wyłączanie routera w godzinach wieczornych	↓ Czas spędzany przed ekranem (dzienniki urządzeń); ↓ Reakcja stresowa zrenic
Spersonalizowane informacje zwrotne (Hare i in., 2009; McClure i in., 2004)	Aktywacja kory przedczołowej	Informacje zwrotne w aplikacji porównujące zachowanie do norm wiekowych	↑ Świadomość; ↑ Zaangażowanie PFC podczas podejmowania decyzji

Uwaga: Wszystkie przykłady są oparte kluczowymi odniesieniami z literatury neuroekonomicznej.

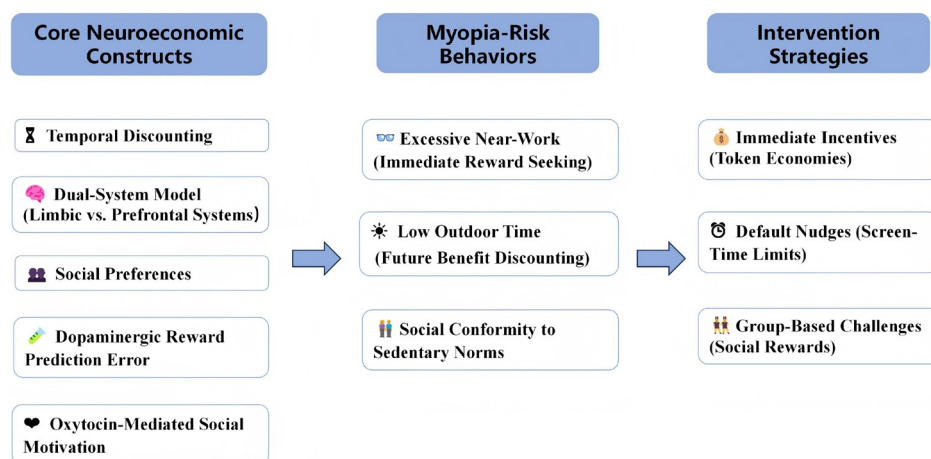
nagradzanie, wykorzystywanie norm społecznych i troski o reputację w celu dostosowania zachowań do celów zdrowotnych oraz ograniczanie wysiłku poznawczego wymaganego do samokontroli. Dzięki połączeniu wyników pomiarów neuronalnych – takich jak badania funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI) dotyczące wyborów międzyokresowych i preferencji społecznych oraz pomiary psychofizjologiczne, takie jak pupilometria i reakcja przewodnictwa skóry – możemy uzyskać bezprecedensowy wgląd w mechanizmy skuteczności i niepowodzeń interwencji (Falk i in., 2012). W niniejszym przeglądzie omówimy te zastosowania, rozważymy kwestie metodologiczne i etyczne związane z badaniem interwencji opartych na neuroekonomii w populacjach pediatrycznych oraz nakreślimy przyszły program badań. Ostatecznie stwierdzamy, że wykorzystanie potencjału neuroekonomii nie jest jedynie ćwiczeniem akademickim, ale niezbędnym krokiem w kierunku opracowania nowej generacji skutecznych, opartych na wiedzy biologicznej i skalowalnych strategii ochrony zdrowia wzroku dzieci i młodzieży na całym świecie.

2 | PODSTAWY TEORETYCZNE

Zastosowanie neuroekonomii w działaniach związanych ze zdrowiem publicznym, takich jak zapobieganie krótkowzroczności, opiera się na zestawie dobrze ugruntowanych konstrukcji teoretycznych, które wyjaśniają neuronalne podstawy podejmowania decyzji, jak podsumowano na rysunku 1. Centralnym elementem tych ram jest koncepcja wyboru międzyokresowego, która opisuje, w jaki sposób jednostki dokonują kompromisów między kosztami a korzyściami występującymi w różnych momentach czasu. Tendencja do nieproporcjonalnego zaniżania wartości przyszłych korzyści na rzecz natychmiastowej gratyfikacji nazywana jest dyskontowaniem czasowym (Hayden, 2016). Z perspektywy neuroekonomii nie jest to jedynie błąd w obliczeniach poznawczych, ale odzwierciedlenie konkurencji neuronowej. Badania neuroobrazowe jednoznacznie wykazały, że wybory na rzecz natychmiastowych korzyści wiążą się ze zwiększoną aktywnością układu limbicznego i prążkowiec brzuszny – obszarów mózgu silnie unerwionych dopaminą i związanych z przetwarzaniem nagród, znaczeniem bodźców motywacyjnych i impulsywną motywacją (Kable & Glimcher, 2007; McClure et al., 2004). Natomiast wybory sprzyjające odroczonej, większym nagrodom angażują boczną korę przedczołową (LPFC) i tylną

kora ciemieniowa, obszary kluczowe dla funkcji wykonawczych, takich jak kontrola poznawcza, planowanie przyszłości i tłumienie impulsywnych reakcji (Figner i in., 2010; Hare i in., 2009). W konkretnym kontekście zapobiegania krótkowzroczności wybór dziecka dotyczący spędzania czasu przed ekranem stanowi klasyczny przykład tej konkurencji neuronowej. System impulsywny szybko przypisuje wysoką wartość natychmiastowej rozrywki i łączności społecznej oferowanej przez urządzenia cyfrowe. Jednocześnie system refleksyjny, odpowiedzialny za ocenę abstrakcyjnych i odroczonej korzyści wynikających z „zapobiegania krótkowzroczności w wieku dorosłym”, jest zarówno niedojrzały rozwojowo, jak i często wyczerpany poznawczo przez inne wymagania. W rezultacie wyraźny, natychmiastowy sygnał nagrody często przeważa nad słabszym, zorientowanym na przyszłość sygnałem, co prowadzi do preferowania pracy z bliska nad aktywnością na świeżym powietrzu. Decyzja o długotrwałej pracy z bliska (np. korzystanie ze smartfona) w celu uzyskania natychmiastowej rozrywki, a tym samym pominięcie przyszłego ryzyka krótkowzroczności, może być bezpośrednio modelowana jako wynik, w którym sygnały wyceny w systemie impulsywnym przeważają nad zdolnością regulacyjną systemu refleksyjnego. Ten model podwójnego systemu zapewnia neuronalne wyjaśnienie ograniczonej skuteczności interwencji, które odwołują się wyłącznie do długoterminowych konsekwencji zdrowotnych; angażują one przede wszystkim system refleksyjny, nie łagodząc nadaktywnej reakcji systemu impulsywnego na natychmiastowe alternatywy (Hofmann et al., 2009).

Ponadto zachowania związane z krótkowzrocznością mają charakter głęboko społeczny, co sprawia, że teoria preferencji społecznych stanowi kolejny kluczowy filar. Wybory dzieci i młodzieży są silnie kształtowane przez normy społeczne, wpływ rówieśników oraz troskę o sprawiedliwość i wzajemność – czynniki głęboko zakorzenione w obwodach neuronowych. Na przykład gra ultimatum, kanoniczny paradigmat eksperymentalny, wykazała, że ludzie często odrzucają niesprawiedliwe oferty pieniężne, ponosząc osobiste koszty, co jest zachowaniem związanym z aktywacją przedniej wyspy (powiązanej z negatywnymi stanami emocjonalnymi, takimi jak wstępną i gniew) oraz grzbiętowej przedniej kory cingulum (dACC, zaangażowanej w monitorowanie konfliktów) (Civai et al., 2012; Sanfey i in., 2003). Ta reakcja neuronowa na nierówność sugeruje, że dziecko może odrzucić „sprawiedliwe” zachowanie zdrowotne (np. samodzielne wychodzenie na zewnątrz), jeśli w kontekście społecznym jest ono postrzegane jako niesprawiedliwe odstępstwo od norm grupowych (np. wszyscy przyjaciele



RYS. 1

Teoretyczna fra mwork: powiązanie konstruktów neuroekonomicznych z zachowaniami miogenicznymi i celami interwencji.

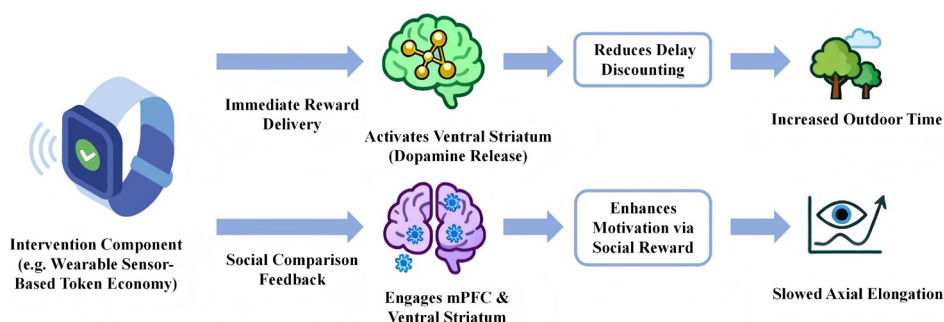
są grami domowymi). Z drugiej strony, zachowania kooperacyjne i prospołeczne są wzmacniane przez system nagród w mózgu. Działania zgodne z normami społecznymi lub budujące zaufanie aktywują prążkowie brzuszne i obszar przegrody, generując wewnętrzny sygnał nagrody, który wzmacnia dane zachowanie (Fehr & Camerer, 2007; Rilling & Sanfey, 2011). Dlatego też interwencja, która skutecznie przedstawia czas spędzany na świeżym powietrzu jako działanie sprzyjające spójności społecznej, normatywne i sprawiedliwe w grupie rówieśniczej, może wykorzystać te mechanizmy uczenia się poprzez wzmacnienie. Jak pokazano na rysunku 2, konkretnym przykładem takiego rozwiązania jest system tokenowy oparty na czujnikach noszonych na ciele, który zapewnia natychmiastową informację zwrotną dotyczącą porównania społecznego oraz nagrody. Taki system sprawia, że zdrowy wybór jest nie tylko rozsądny, ale także społecznie satysfakcjonujący.

Oprócz systemów neuronowych odpowiedzialnych za ocenę i społeczność, neuroekonomia bada również rolę konkretnych mechanizmów neurochemicznych, które modulują te obwody. Dopamina, kluczowy neuroprzekaźnik, ma fundamentalne znaczenie dla uczenia się przez wzmacnienie i kodowania błędów przewidywania nagrody – różnicy między oczekiwanymi a rzeczywistymi nagrodami, która napędza proces uczenia się (Schultz et al., 1997). Mechanizm ten ma kluczowe znaczenie dla kształtowania nawyków; natychmiastowe nagrody związane z rozrywką cyfrową skutecznie wzmacniają siedzący tryb życia poprzez precyzyjne sygnały dopaminergiczne. Jak pokazano na rysunku 2, dobrze zaprojektowana ekonomia tokenowa może naśladować takie natychmiastowe dostarczanie nagród, aktywując prążkowie brzuszne i zmniejszając dyskontowanie opóźnień, promując w ten sposób zwiększenie czasu spędzanego na świeżym powietrzu i spowolnienie wydłużania osiowego. Co najważniejsze, ostateczną ścieżką biologiczną, poprzez którą te interwencje neurobehawioralne wywierają swój wpływ, jest dobrze znany mechanizm hamowania krótkowzroczności: zwiększona ekspozycja na światło stymuluje uwalnianie dopaminy w siatkówce, co z kolei hamuje wydłużanie osiowe, kluczową zmianę strukturalną w postępie krótkowzroczności (Morgan i in., 2018). Nasza struktura ukierunkowana jest na proces podejmowania decyzji na wyższym szczeblu, aby w naturalny sposób aktywować ten biologiczny mechanizm na niższym szczeblu. Wręcz przeciwnie, wykazano, że neuropeptyd oksytocyna wzmacnia zaufanie, hojność i więzi społeczne poprzez modulowanie aktywności w ciele migdałowatym (kluczowym obszarze odpowiedzialnym za przetwarzanie strachu i zagrożeń społecznych) oraz korze przedczołowej (Baumgartner i in., 2008; Zak i in., 2005). Sugeruje to, że interwencje sprzyjające zaufaniu i pozytywnym więzom społecznym między rodzicami a dziećmi lub w grupach rówieśniczych mogłyby wykorzystać układ oksytocyny do zmniejszenia postrzeganego „ryzyka społecznego” związanego z przyjęciem nowych zachowań zdrowotnych i zwiększenia wartości nagrody wynikającej ze wspólnych zajęć na świeżym powietrzu. Perspektywa endokrynologiczna zatem

wykracza poza czysto poznawczy model zmiany zachowań, sugerując, że interwencje biochemiczne (np. poprzez działania, które w naturalny sposób podnoszą poziom oksytocyny) mogą potencjalnie obniżyć bariery neuronalne utrudniające przestrzeganie zaleceń. W połączeniu te podstawowe koncepcje neuroekonomiczne – wybór międzyokresowy napędzany przez konkurujące ze sobą systemy neuronowe, preferencje społeczne osadzone w określonych obwodach i zachowania modulowane przez neurohormony – tworzą wielopoziomowe, oparte na biologii ramy służące do dekonstrukcji błędów decyzyjnych leżących u podstaw epidemii krótkowzroczności. Ramy te nie tylko opisują zachowania, ale wskazują bezpośrednio na możliwe do realizacji cele neuronowe i psychologiczne interwencji.

3 | SCENARIUSZE ZASTOSOWANIA

Opierając się na neuroekonomicznych ramach podejmowania decyzji, możemy obecnie nakreślić szereg ukierunkowanych, opartych na mechanizmach strategii interwencyjnych mających na celu zapobieganie krótkowzroczności. Strategie te mają na celu świadome manipulowanie neuronowymi obliczeniami wartości, preferencji społecznych i przewidywania nagród, aby zachowania ochronne stały się bardziej atrakcyjne i łatwiejsze do wykonania. Głównym zastosowaniem jest strategiczne projektowanie systemów motywacyjnych. Tradycyjne porady, takie jak „spędzaj więcej czasu na świeżym powietrzu”, wiążą się z natychmiastowymi kosztami (rezygnacja z czasu spędzanego przed ekranem) dla odległych korzyści. Neuroekonomia sugeruje zmianę tej dynamiki poprzez włączenie natychmiastowych, namacalnych nagród do struktury decyzyjnej. Na przykład system ekonomii tokenowej mógłby zostać wdrożony za pośrednictwem platformy cyfrowej, na której dzieci zdobywają punkty lub mikropłatności (bezpośrednia, pewna nagroda) w sposób weryfikowalny powiązany z czasem spędzonym na świeżym powietrzu, mierzony za pomocą noszonych urządzeń GPS lub czujników światła (Loewenstein et al., 2013; Patel et al., 2015). Podejście to nie opiera się na założeniu, że aktywność na świeżym powietrzu jest z natury nieprzyjemna, ale raczej uznaje, że we współczesnym środowisku natychmiastowe i silne nagrody związane z rozrywką cyfrową mogą przeważać nad często bardziej abstrakcyjnymi i opóźnionymi nagrodami związanymi z zabawą na świeżym powietrzu. Ekonomia tokenowa służy do tymczasowego „wypełnienia luki czasowej” i ponownej kalibracji sygnału wartości, sprawiając, że początkowa decyzja o wyjściu na zewnątrz staje się bardziej istotna. Z czasem celem jest, aby wewnętrzne korzyści płynące z zabawy na świeżym powietrzu, takie jak radość, opanowanie umiejętności i kontakty społeczne, stały się głównym czynnikiem wzmacniającym, a proces ten mogą ułatwić właśnie te interwencje. Przełomowa praca Volppa i innych na temat zachęty finansowych do utraty wagi i rzucenia palenia pokazuje, że



RYS. 2
powietrzu.

Mechanizmy działania programu „” – interwencji opartej na neuroekonomii, mającej na celu zwiększenie czasu spędzanego na świeżym

Takie umowy oparte na depozytach, które wykorzystują niechęć do strat, znacznie poprawiają wyniki (Volpp et al., 2011). W przypadku krótkowzroczności niewielka wpłata pieniężna dziecka (lub rodzica) mogłaby zostać zwrócona lub pomnożona w zależności od osiągnięcia tygodniowych celów dotyczących czasu spędzanego na świeżym powietrzu, dzięki czemu potencjalna utrata depozytu stałaby się silnym bezpośrednim czynnikiem motywującym, aktywującym obwody neuronowe związane z unikaniem ryzyka i strat.

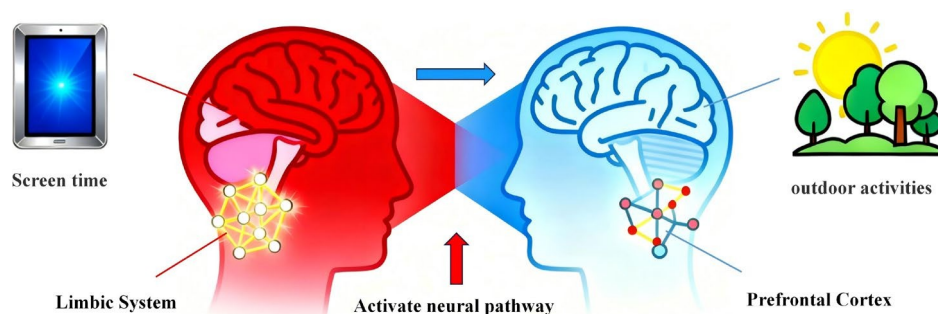
Ponadto należy wykorzystać silny wpływ preferencji społecznych, a nie je przewyżczać. Interwencje powinny być zaprojektowane tak, aby zmienić postrzegane normy społeczne i wykorzystać wewnętrzną wartość nagrody wynikającą z konformizmu i sprawiedliwości. Można to osiągnąć poprzez grupowe wyzwania w szkołach lub społecznościach, gdzie nagrody są uzależnione od zbiorowych wyników (np. średnia dla całej klasy wynosząca 2 godziny dziennego czasu spędzanego na świeżym powietrzu) (Kullgren et al., 2014). Taki projekt wykorzystuje mechanizmy neuronalne współpracy i tożsamości zbiorowej, sprawiając, że zgodność staje się zachowaniem wzmacniającym społecznie, które aktywuje prążkowie brzuszne (Falk & Bassett, 2017). Ponadto przekazywanie dzieciom i rodzicom informacji zwrotnych na temat ich wyników w porównaniu z normatywną grupą (np. „Twoja rodzina znajduje się w pierwszej dziesiątce pod względem czasu spędzanego na świeżym powietrzu w Twoim mieście”) może wykorzystać naturalną wrażliwość mózgu na porównania społeczne i status, angażując takie obszary jak przyśrodkowa kora przedczołowa (Meshi i in., 2015). Platformy cyfrowe mogą dodatkowo wzmocnić ten efekt, tworząc wspólne, pozytywne doświadczenia społeczne związane z aktywnością na świeżym powietrzu, wykorzystując elementy grywalizacji, takie jak zawody drużynowe i tabele wyników. Przekształca to samotną czynność w misję angażującą społecznie, łagodząc aktywację przedniej wyspy, która może być związana z poczuciem wykluczenia lub „tracenia” okazji do udziału w zajęciach towarzyskich w pomieszczeniach. Na rysunku 3 podstawowy mechanizm neurokognitywny leżący u podstaw tych interwencji obejmuje zmianę motywacji behawioralnej: od pasywnego zaangażowania opartego na ekranie, które stymuluje głównie układ limbiczny, w kierunku aktywnych zajęć na świeżym powietrzu, które angażują korę przedczołową i aktywują adaptacyjne ścieżki neuronowe. Ten model koncepcyjny podkreśla, w jaki sposób ukierunkowane zachęty i strategie społeczne mogą funkcjonalnie zmienić orientację obliczania wartości i wzmocnić procesy samoregulacji.

Wreszcie neuroekonomia opowiada się za interwencjami, które zmniejszają obciążenie poznawcze delikatnego systemu kontroli wykonawczej. Konieczność ciągłej samokontroli wyczerpuje zasoby poznawcze, prowadząc do niepowodzeń (Muraven & Baumeister, 2000). Dlatego najskuteczniejsze są interwencje, które sprawiają, że zdrowy wybór staje się wyborem domyślnym lub łatwiejszym, minimalizując w ten sposób potrzebę

wysiłkowej samoregulacji. Chociaż nasze ramy skupiają się na podejmowaniu decyzji przez dziecko, rola rodziców i szkół jako architektów środowiska wyborów dziecka ma ogromne znaczenie. Zasady neuroekonomii można rozszerzyć, aby kierowały odpowiedzialnością rodziców i instytucji. Na przykład rodzice mogą stosować urządzenia do wstępnego ustalania limitów czasu spędzanego przed ekranem w domowych routerach, skutecznie czyniąc ograniczenie czasu spędzanego przed ekranem opcją domyślną (Rogers & Bazerman, 2008). Szkoły mogą przeprojektować architekturę wyborów, integrując zajęcia na świeżym powietrzu i zapewniając atrakcyjne place zabaw, zmniejszając w ten sposób wysiłek poznawczy wymagany od dzieci, aby wybrały zajęcia na świeżym powietrzu zamiast zajęć w pomieszczeniach. Zaangażowanie tych kluczowych interesariuszy przekształca interwencję z walki skoncentrowanej na dziecku w strukturę wsparcia obejmującą cały system (Kuang i in., 2023). Strategie te działają poprzez zmniejszenie aktywacji prążkowie brzusz. Podobnie, wcześniej ustalone plany wykorzystują preferencje neuronowe dotyczące rutyny i opcji domyślnych, omijając za każdym razem wymagający poznawczy proces rozważnego wyboru (Rogers & Bazerman, 2008). Dostosowując strategie zdrowia publicznego do automatycznych, opartych na heurystyce procesów zachodzących w mózgu, możemy projektować środowiska, w których zdrowy wybór staje się ścieżką najmniejszego oporu, trwale chroniąc zdrowie wzroku dzieci poprzez łatwiejsze podejmowanie lepszych decyzji.

4 | METODOLOGICZNE PODEJŚCIA

Rygorystyczne opracowanie i walidacja interwencji opartych na neuroekonomii wymaga zastosowania podejścia wielometodologicznego. Chociaż wdrożenie na dużą skalę może ostatecznie opierać się na skalowalnych narzędziach cyfrowych, wstępne badania potwierdzające słuszność koncepcji wymagają dogłębnej walidacji mechanistycznej, aby zapewnić, że interwencje są ukierunkowane na zamierzone procesy neuronalne. Wymaga to zastosowania zestawu zadań behawioralnych, pomiarów fizjologicznych i technik neuroobrazowania w celu obiektywnej kwantyfikacji mechanistycznego wpływu interwencji na docelowe procesy decyzyjne. Po pierwsze, zadania z zakresu ekonomii behawioralnej stanowią sprawdzone i skalowalne narzędzie do oceny indywidualnych różnic w cechach poznawczych leżących u podstaw zachowań zwiększających ryzyko krótkowzroczności. Na przykład zadanie dotyczące dyskontowania czasowego można przeprowadzić wśród dzieci w celu uzyskania ilościowej stopy dyskontowej (wartości k).



RYS. 3 Przejście neurokognitywnej uwagi z czasu spędzanego przed ekranem na aktywność na świeżym powietrzu poprzez zaangażowanie układu limbicznego i kory przedczołowej.

który odzwierciedla ich skłonność do deprecjonowania przyszłych korzyści (Epstein i in., 2014). Wysoka wartość k , wskazująca na silną preferencję dla natychmiastowej gratyfikacji, może służyć jako biomarker pozwalający przewidzieć słabe przestrzeganie zaleceń dotyczących czasu spędzanego na świeżym powietrzu. Podobnie zadania mierzące awersję do ryzyka (np. wybory loteryjne) i preferencje społeczne (np. dostosowana do dzieci gra zaufania lub gra ultimatum) mogą zidentyfikować podgrupy, dla których określone elementy interwencji (np. gwarantowane vs. probabilistyczne zachęty; nagrody indywidualne vs. grupowe) byłyby najbardziej skuteczne (Falk i in., 2011; Fehr & Camerer, 2007). Te testy behawioralne stanowią kluczowe ogniwo między konstruktami teoretycznymi a rzeczywistymi zachowaniami, umożliwiając badaczom stratyfikację uczestników i personalizację strategii interwencyjnych w oparciu o ich fenotyp poznawczy. Aby uchwycić podświadome i automatyczne reakcje neuronowe, które często poprzedzają świadomy wybór, niezbędne są metody fizjologiczne i neuroobrazowe. Funkcjonalna spektroskopia w bliskiej podczerwieni (fNIRS) jest szczególnie dobrze dostosowana do badań neuroekonomicznych w pediatrii ze względu na wysoką tolerancję na ruch, przenośność i stosunkowo niski koszt (Piper i in., 2014). Badanie fNIRS może mierzyć aktywność hemodynamiczną w korze przedczołowej (PFC) dzieci podczas oglądania bodźców promujących siedzący tryb życia (np. nowa gra wideo) w porównaniu z aktywnymi zajęciami na świeżym powietrzu. Skuteczna interwencja mająca na celu poprawę kontroli poznawczej powinna przejawiać się zwiększoną aktywnością PFC podczas operowania się pokusom siedzącego trybu życia, zapewniając neuronalny korelat jej skuteczności (Falk & Bassett, 2017). Ponadto śledzenie ruchu gałek ocznych i pomiar źrenicy oferują nieinwazyjne i bardzo precyzyjne pomiary uwagi i wysiłku poznawczego. Na przykład pomiar rozszerzenia źrenic (wiarygodny wskaźnik obciążenia poznawczego i pobudzenia afektywnego) podczas podejmowania przez dzieci decyzji dotyczących czasu spędzanego przed ekranem może ujawnić, czy interwencja zmniejsza wewnętrzny konflikt związany z wyborem zdrowszej alternatywy (Laeng et al., 2012). Narzędzia te można wykorzystać w rzeczywistych warunkach, takich jak szkoły lub domy, aby uzyskać ekologicznie ważne informacje na temat podejmowania decyzji.

procesu tworzenia w miarę jego postępów.

Aby obiektywnie określić kluczowe czynniki ryzyka związane z krótkowzrocznością, można wykorzystać urządzenia do noszenia, takie jak inteligentne zegarki lub czujniki towarzyszące, do oszacowania czasu trwania pracy w bliskiej odległości za pomocą czujników zbliżeniowych lub inercyjnych jednostek pomiarowych, które wykrywają utrzymywaną, statyczną pozycję głowy skierowaną w dół, typową dla czytania i korzystania z ekranu (Hartwig i in., 2011; Liang i in., 2024). W połączeniu z czujnikiem światła otoczenia pozwala to stworzyć kompleksowy cyfrowy fenotyp charakteryzujący się długotrwałą pracą w bliskiej odległości/niską ekspozycją na światło zewnętrzne, co kontrastuje z pożądanym profilem niskiej ekspozycji na światło zewnętrzne/długotrwałej pracy w bliskiej odległości. To dwuparametrowe podejście stanowi bogatszą podstawę do wprowadzania dostosowanych interwencji w odpowiednim momencie niż każda z tych metod stosowana osobno. Wreszcie, włączenie pobierania próbek biologicznych do projektów badawczych pozwala na zbadanie szlaków neuroendokrynologicznych. Badania śliny w celu pomiaru poziomu kortyzolu pozwalają obiektywnie określić poziom stresu związanego ze zmianą zachowania (np. stres związany z rozłąką z urządzeniem), natomiast pomiar poziomu oksytocyny przed i po rodzinnej aktywności na świeżym powietrzu może stanowić biologiczną podstawę dla zwiększenia motywacji społecznej i więzi (Grewen i in., 2005; Van IJzendoorn & Bakermans-Kranenburg, 2012). Co najważniejsze,

połączenie tych metod pozwoli uzyskać niezwykle kompleksowy model tego, jak i dlaczego interwencja działa. Ta wielopoziomowa struktura oceny ma zasadnicze znaczenie dla przejścia od zwykłego wykazania skuteczności do zrozumienia dokładnych mechanizmów zmiany zachowań, umożliwiając w ten sposób iteracyjną optymalizację strategii opartych na neuroekonomii w celu ochrony wzroku dzieci.

5 | WYZWANIA I KWESTIE ETYCZNE

Przeniesienie neuroekonomii do praktyki zdrowia publicznego, szczególnie w tak delikatnej dziedzinie, jaką jest profilaktyka krótkowzroczności u dzieci, wiąże się z poważnymi problemami metodologicznymi i etycznymi, które należy dokładnie przeanalizować. Głównym wyzwaniem jest trajektoria rozwoju mózgu dziecka. Obwody neuronowe kluczowe dla modeli neuroekonomicznych – zwłaszcza obszary przedczołowe odpowiedzialne za kontrolę poznawczą i planowanie przyszłości – przechodzą głęboką maturację w okresie dzieciństwa i dorastania (Casey i in., 2005). Wymaga to starannego dostosowania interwencji i narzędzi pomiarowych do wieku pacjenta. Zadania behawioralne lub protokoły neuroobrazowania zatwierdzone u osób dorosłych mogą nie odzwierciedlać dokładnie procesów decyzyjnych młodszych dzieci, których zdolności poznawcze i reakcje neuronowe wciąż ulegają zmianom. W związku z tym konieczne jest przeprowadzenie badań longitudinalnych w celu śledzenia, jak skuteczność konkretnej interwencji (np. określonej struktury motywacyjnej) może ewoluować wraz z rozwojem mózgu dzieci, zapewniając skuteczność strategii w różnych grupach wiekowych (Steinberg, 2008).

Oprócz przeszkód metodologicznych, stosowanie interwencji neuroekonomicznych rodzi głębokie dylematy etyczne. Najpilniejszą kwestią jest kwestia świadomej zgody i wyrażenia zgody. Biorąc pod uwagę złożony i czasami ukryty charakter bodźców i manipulacji neuronowych, uzyskanie prawdziwie świadomej zgody rodziców i znaczącej zgody dzieci jest trudnym zadaniem. Uczestnicy muszą w pełni zrozumieć, że interwencje mają na celu podświadomą zmianę ich wyobrażeń o wartościach i zachowań, co wykracza poza przejrzystość wymagana zazwyczaj w badaniach klinicznych (Blumenthal-Barby & Burroughs, 2012). Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej w przypadku stosowania neuroobrazowania (np. fNIRS) lub monitorowania fizjologicznego u nieletnich; należy czujnie chronić się przed potencjalnym przymusem, nawet jeśli jest on niezamierzony.

Gromadzenie wysoce wrażliwych danych neurologicznych i behawioralnych wiąże się z poważnym ryzykiem dla prywatności i bezpieczeństwa. Wzory aktywności mózgu dziecka, jego tendencje poznawcze i predyspozycje genetyczne stanowią wyjątkowo osobiste informacje. Niewłaściwe wykorzystanie lub naruszenie takich danych może prowadzić do stygmatyzacji społecznej lub dyskryminacji w przyszłości (Illes & Bird, 2006). Solidne protokoły anonimizacji danych i bezpieczne rozwiązania w zakresie przechowywania danych są niepodważalne, a polityki muszą jasno określać, kto może uzyskać dostęp do tych danych i w jakim celu, ściśle ograniczając ich wykorzystanie do określonych celów badawczych.

Ponadto istnieje realne ryzyko pogłębienia nierówności zdrowotnych. Neuroekonomia

Interwencje, zwłaszcza te wykorzystujące technologie noszone na ciele i platformy cyfrowe, mogą być łatwiej przyjmowane przez rodziny o wyższym statusie społeczno-ekonomicznym, co potencjalnie pogłębia dysproporcje w częstości występowania krótkowzroczności między warstwami społecznymi (Halpern i in., 2012). W przypadku stosowania zachęt finansowych ich wartość motywacyjna może być nieproporcjonalna w różnych grupach dochodowych, co rodzi pytania o sprawiedliwość i sprawiedliwość dystrybucyjną. Dlatego też kluczowym imperatywem etycznym jest opracowanie interwencji, które będą dostępne, skuteczne i sprawiedliwe dla różnych grup społecznych. Wreszcie, sam cel manipulowania procesem podejmowania decyzji dla „dobra dziecka” wkracza na etycznie niejednoznaczny teren. Chociaż intencja – zachowanie wzroku – jest jednoznacznie korzystna, środki obejmują celowe pominięcie racjonalnych rozważań w celu wywarcia podświadomego wpływu na wybory. Powoduje to istotną debatę na temat autonomii i paternalizmu: gdzie leży granica między uzasadnionym wpływaniem na zdrowie publiczne a nieetyczną manipulacją rozwijającym się umysłem? (Wilkinson, 2013). Ponadto należy dokładnie rozważyć ryzyko, że zewnętrzne nagrody osłabiają wewnętrzną motywację.

Nadmierne poleganie na namacalnych zachętach może potencjalnie zmniejszyć naturalną radość dziecka z zabawy na świeżym powietrzu. Aby temu zapobiec, interwencje powinny być zaprojektowane zgodnie ze strategią „zanikania”, w której namacalne nagrody są stopniowo zastępowane wzmocnieniem społecznym oraz możliwościami samokontroli i opanowania.

Ostatecznym celem jest, aby wewnętrzne korzyści płynące z aktywności na świeżym powietrzu, takie jak zabawa, autonomia i więzi społeczne, stały się głównym czynnikiem motywującym, a początkowa nagroda zewnętrzna służyła jedynie jako katalizator do przełamania inercji decyzyjnej.

Podejście to chroni również przed ryzykiem stworzenia nadmiernej zależności od zewnętrznych nagród, które w przeciwnym razie mogłyby zagrozić rozwojowi prawdziwej wewnętrznej motywacji do zdrowych zachowań. W związku z tym kluczowym imperatywem etycznym jest opracowywanie interwencji, które nie tylko wykazują krótkoterminową skuteczność, ale także aktywnie promują długoterminową autonomię i trwale kształtowanie nawyków, zapewniając, że zarówno środki, jak i cele pozostają etyczne.

uzasadnione z punktu widzenia praktycznego.

6 | KIERUNKI NA PRZYSZŁOŚĆ

Przyszłe badania muszą skupiać się na programie translacyjnym, który przechodzi od mechanistycznych badań potwierdzających słusność koncepcji do skalowalnego wdrożenia w zakresie zdrowia publicznego. Istotnym kierunkiem jest opracowanie interwencji zróżnicowanych pod względem rozwoju. W przypadku młodszych dzieci (np. poniżej 8 roku życia), których przedczołowe systemy regulacyjne wciąż dojrzewają, strategie powinny kłaść nacisk na bodźce środowiskowe i rutyny wprowadzane przez rodziców. W przypadku dzieci w wieku szkolnym natychmiastowe systemy tokenowe i wyzwania w grupie rówieśniczej mogą skutecznie wykorzystać ich rosnącą wrażliwość na nagrody społeczne i sprawiedliwość. W przypadku nastolatków interwencje mogą obejmować aplikacje do wyznaczania celów oraz odwołania do autonomii i tożsamości, dostosowane do ich zaawansowanej, ale wciąż rozwijającej się kontroli poznawczej i samooceny (Chen et al., 2025; Crone & Dahl, 2012). Opierając się na tych ramach rozwojowych, kolejnym kluczowym krokiem jest opracowanie spersonalizowanych strategii interwencyjnych w oparciu o indywidualne fenotypy neurobehawioralne. Badania

powinny zbadać, czy dzieci o wysokim wskaźniku dyskutowania czasowego lub określonych wzorcach aktywacji neuronowej reagują bardziej pozytywnie na określone struktury motywacyjne (np. nagrody natychmiastowe w porównaniu z opóźnionymi, gwarantowane w porównaniu z probabilistycznymi) (Onnela & Rauch, 2016). Takie precyzyjne podejście do zdrowia publicznego, wykorzystujące biomarkery z zadań i czujników noszonych na ciele, mogłoby zmaksymalizować skuteczność i alokację zasobów.

Ponadto integracja cyfrowych technologii medycznych stanowi podatny grunt dla innowacji. Konieczne są badania podłużne w celu zbadania wykorzystania ekologicznej oceny chwilowej (EMA) opartej na smartfonach do uchwycenia kontekstów decyzji podejmowanych w czasie rzeczywistym (np. lokalizacja, otoczenie społeczne, nastroj), które powodują ryzykowne zachowania związane z pracą, umożliwiając opracowanie interwencji adaptacyjnych typu just-in-time (JITAI), które dostarczają spersonalizowane bodźce w momentach wysokiej podatności (Nahum-Shani et al., 2018). Wreszcie, niezwykle ważne jest międzykulturowe walidowanie i sprawiedliwe wdrażanie tych strategii. Badania muszą sprawdzić, czy mechanizmy neuronalne i skuteczność interwencji mają charakter ogólny w różnych kontekstach kulturowych, w których obowiązują różne normy dotyczące rodzicielstwa, zabawy i edukacji. Musimy opracować niedrogie, mało zaawansowane technologicznie wersje interwencji (np. nagrody grupowe niezależne od osobistych urzędzeń do noszenia), aby zapewnić dostępność i zapobiec pogłębianiu się nierówności w zakresie zdrowia, zwłaszcza w środowiskach o ograniczonych zasobach. Konieczność ta jest dodatkowo podkreślona przez różnice w częstości występowania krótkowzroczności w różnych regionach (np. w Azji Wschodniej i na Zachodzie) oraz w różnych poziomach urbanizacji (np. w środowiskach wysoce zurbanizowanych w porównaniu z obszarami wiejskimi). Jest ona również wzmocniona przez rozbieżne postawy kulturowe, w tym dominujące filozofie edukacyjne, różne postrzeganie ryzyka i korzyści przez rodziców oraz kontrastujące normy społeczne dotyczące wypoczynku i pracy naukowej, które wymagają bardziej szczegółowego zbadania. Konieczne jest zatem zbadanie, czy mechanizmy neuronalne leżące u podstaw podejmowania odpowiednich decyzji są uniwersalne, czy też modulowane kulturowo (Henrich et al., 2010). W ramach tych badań należy wyraźnie zbadać, w jaki sposób czynniki środowiskowe, takie jak dostęp do terenów zielonych, presja edukacyjna i lokalne normy zachowań, kształtują czynniki wpływające na pracę z bliska i zachowania na świeżym powietrzu. Na przykład w środowiskach wiejskich, gdzie czas spędzany na świeżym powietrzu jest często integralną częścią codziennego życia, interwencje mogłyby skupiać się mniej na zachęcaniu do „wychodzenia na zewnątrz”, a bardziej na ograniczaniu konkurencyjnych atrakcji w pomieszczeniach. Natomiast w gęsto zaludnionych obszarach miejskich o ograniczonej przestrzeni zewnętrznej strategie mogą wymagać uwzględnienia postrzeganych kosztów alternatywnych czasu spędzanego na świeżym powietrzu i wykorzystania lokalnych wpływów społecznych. Badania muszą zatem sprawdzić skuteczność i neuronalne korelaty takich interwencji w całym spektrum miejsko-wiejskim i społeczno-ekonomicznym, aby zapewnić, że strategie oparte na neuroekonomii są zarówno sprawiedliwe, jak i mają globalne zastosowanie — ostatecznie realizując swój potencjał w zakresie pomocy w ograniczeniu pandemii krótkowzroczności.

7 | WNIOSKI

Neuroekonomia zapewnia przełomowe ramy dla zrozumienia i rozwiązania problemów związanych z zachowaniami wynikającymi z pandemii krótkowzroczności. Wykraczając poza tradycyjne modele racjonalnego wyboru, rzuca światło na

mechanizmy neuronalne i obliczeniowe leżące u podstaw decyzji faworyzujących natychmiastową gratyfikację związaną z korzystaniem z ekranów kosztem długoterminowego zdrowia wzroku. W niniejszym przeglądzie argumentowano, że skuteczne interwencje muszą być strategicznie zaprojektowane tak, aby ukierunkować się na te mechanizmy — poprzez ponowne skalibrowanie sygnałów wartości, wykorzystanie nagród społecznych i zmniejszenie wysiłku poznawczego. Chociaż nadal istnieją poważne wyzwania etyczne i metodologiczne, włączenie spostrzeżeń neuroekonomicznych do strategii zdrowia publicznego stanowi obiecującą ścieżkę do opracowania bardziej skutecznych, skalowalnych i spersonalizowanych interwencji mających na celu zachowanie wzroku przyszłych pokoleń.

AUTORZY


Koncepcja i projekt: Chen-Wei Pan i Dan-Lin Li. *Analiza i interpretacja:* Dan-Lin Li. *Gromadzenie danych:* Dan-Lin Li. *Opracowanie manuskryptu:* Dan-Lin Li i Ting-Han Guo. *Krytyczna weryfikacja manuskryptu:* Ting-Han Guo, Andrzej Grzybowski i Chen-Wei Pan. *Ogólna odpowiedzialność:* Chen-Wei Pan.

INFORMACJE O FINANSOWANIU

Badania te są finansowane przez Narodową Fundację Nauk Przyrodniczych Chin (82504435) oraz Projekt Planowania Naukowego i Technologicznego Suzhou (SYW2025191). Organizacja finansująca nie miała wpływu na projekt ani przebieg badań.

ORCID

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

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

Chen-Wei Pan  <https://orcid.org/0000-0003-3362-4613>

REFERENCJE

- Baumgartner, T., Heinrichs, M., Vonlanthen, A., Fischbacher, U. & Fehr, E. (2008) Oxytocin shapes the neural circuitry of trust and trust adaptation in humans. *Neuron*, 58, 639–650.
- Biswas, S., El, K.A., Qureshi, M., Lee, D., Sun, C.H., Lam, J. i in. (2024) Wpływ środowiska i stylu życia na krótkowzroczność. *Journal of Physiological Anthropology*, 43, 7.
- Blumenthal-Barby, J.S. & Burroughs, H. (2012) W poszukiwaniu lepszych wyników opieki zdrowotnej: etyka stosowania „nudge”. *The American Journal of Bioethics*, 12, 1–10.
- Bullimore, M.A. & Brennan, N.A. (2019) Kontrola krótkowzroczności: dlaczego każda dioptria ma znaczenie. *Optometry and Vision Science*, 96, 463–465.
- Casey, B. i Caudle, K. (2013) Mózg nastolatka: samokontrola. *Current Directions in Psychological Science*, 22, 82–87.
- Casey, B.J., Tottenham, N., Liston, C. & Durston, S. (2005) Obrazowanie rozwijającego się mózgu: czego dowiedzieliśmy się o rozwoju poznawczym? *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 104–110.
- Chen, M., Shu, Q., Li, F., Li, L. & Fan, X. (2025) Zarządzanie krótkowzrocznością w całym cyklu życia. *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, 14, 100161.
- Civai, C., Crescentini, C., Rustichini, A. & Rumiati, R.I. (2012) Równość a interes własny w mózgu: zróżnicowana rola przedniej wyspy i środkowej kory przedczołowej. *NeuroImage*, 62, 102–112.
- Claus, E.D., Kiehl, K.A. & Hutchison, K.E. (2011) Neural and behavioral mechanisms of impulsive choice in alcohol use disorder. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 35, 1209–1219.
- Crone, E.A. & Dahl, R.E. (2012) Rozumienie okresu dojrzewania jako okresu zaangażowania społeczno-afektywnego i elastyczności celów. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13, 636–650.
- Epstein, L.H., Jankowiak, N., Fletcher, K.D., Carr, K.A., Nederkoorn, C., Raynor, H.A. i in. (2014) Kobiety, które są zmotywowane do jedzenia i nie zwracają uwagi na przyszłość, są bardziej otyłe. *Otyłość (Silver Spring)*, 22, 1394–1399.

- Falk, E.B. & Bassett, D.S. (2017) Mózg i sieci społecznościowe: fundamentalne elementy składowe ludzkiego doświadczenia. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 674–690.
- Falk, E.B., Berkman, E.T. i Lieberman, M.D. (2012) Od reakcji neuronowych do zachowań populacji: neuronowa grupa fokusowa przewiduje wpływ mediów na poziomie populacji. *Psychological Science*, 23, 439–445.
- Falk, E.B., Berkman, E.T., Whalen, D. i Lieberman, M.D. (2011) Aktywność neuronowa podczas przekazywania informacji dotyczących zdrowia pozwala przewidzieć spadek palenia tytoniu wykraczający poza samoocenę. *Health Psychology*, 30, 177–185.
- Fehr, E. i Camerer, C.F. (2007) Neuroekonomia społeczna: obwody neuronowe preferencji społecznych. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 419–427.
- Figner, B., Knoch, D., Johnson, E.J., Krosch, A.R., Lisanby, S.H., Fehr, E. i in. (2010) Boczna kora przedczołowa a samokontrola w wyborach międzyokresowych. *Nature Neuroscience*, 13, 538–539.
- 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.
- Grewen, K.M., Girdler, S.S., Amico, J. & Light, K.C. (2005) Wpływ wsparcia partnera na poziom oksytocyny, kortyzolu, noradrenaliny i ciśnienie krwi przed i po ciepłym kontakcie z partnerem. *Psychosomatic Medicine*, 67, 531–538.
- Haarman, A., Enthoven, C.A., Tideman, J., Tedja, M.S., Verhoeven, V. i Klaver, C. (2020) Powikłania krótkowzroczności: przegląd i metaanaliza. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 61, 49.
- Halpern, S.D., Asch, D.A. & Volpp, K.G. (2012) Umowy zobowiązujące jako droga do zdrowia. *BMJ*, 344, e522.
- Han, X., Jin, L., Morgan, I.G., Chang, S., Chen, Q., Wang, D. i in. (2025) Rozwój oczu i wzroku w dzieciństwie: wnioski z dużego prospektywnego badania kohortowego przeprowadzonego wśród chińskich dzieci. *Acta Ophthalmologica*, 104, 75–81.
- Hare, T.A., Camerer, C.F. & Rangel, A. (2009) Samokontrola w podejmowaniu decyzji wymaga modulacji systemu oceny vmPFC. *Science*, 324, 646–648.
- Hartwig, A., Gowen, E., Charman, W.N. i Radhakrishnan, H. (2011) Analiza pozycji głowy osób krótkowzrocznych i emmetropowych podczas wykonywania zadania czytania z bliska. *Vision Research*, 51, 1712–1717.
- Hayden, B.Y. (2016) Dyskontowanie czasu i preferencje czasowe u zwierząt: przegląd krytyczny. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 39–53.
- He, M., Xiang, F., Zeng, Y., Mai, J., Chen, Q., Zhang, J. i in. (2015) Wpływ czasu spędzanego na świeżym powietrzu w szkole na rozwój krótkowzroczności wśród dzieci w Chinach: randomizowane badanie kliniczne. *JAMA*, 314, 1142–1148.
- Henrich, J., Heine, S.J. & Norenzayan, A. (2010) Najdziwniejsi ludzie na świecie? *The Behavioral and Brain Sciences*, 33, 61–83; dyskusja 83–135.
- Hofmann, W., Friese, M. i Strack, F. (2009) Impulsywność i samokontrola z perspektywy podwójnego systemu. *Perspectives on Psychological Science*, 4, 162–176.
- 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.
- Hsu, M., Lin, H.T. & McNamara, P.E. (2008) Neuroekonomia podejmowania decyzji w starzejącym się mózgu: przykład opieki długoterminowej. *Advances in Health Economics and Health Services Research*, 20, 203–225.
- Huang, H.M., Chang, D.S. i Wu, P.C. (2015) Związek między pracą z bliska a krótkowzrocznością u dzieci – przegląd systematyczny i metaanaliza. *PLoS One*, 10, e0140419.
- Illes, J. i Bird, S.J. (2006) Neuroetyka: współczesny kontekst etyki w neuronaukach. *Trends in Neurosciences*, 29, 511–517.
- Janz, N.K. & Becker, M.H. (1984) Model przekonań zdrowotnych: dziesięć lat później. *Health Education Quarterly*, 11, 1–47.
- Kable, J.W. & Glimcher, P.W. (2007) Neuronowe korelaty wartości subiektywnej podczas wyboru międzyokresowego. *Nature Neuroscience*, 10, 1625–1633.
- Karouta, C., Thomson, K., Morgan, I. & Ashby, R. (2025) Światło hamuje krótkowzroczność wywołaną soczewką poprzez mechanizm dopaminergiczny zależny od intensywności. *Ophthalmology Science*, 5, 100779.

- Kuang, Y., Huang, Y.N. i Li, S. (2023) Efekt ramowy wyboru międzyczasowego i przestrzennego. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 76, 1298–1320.
- Kullgren, J.T., Harkins, K.A., Bellamy, S.L., Gonzales, A., Tao, Y., Zhu, J. i in. (2014) Randomizowane badanie kontrolowane z wykorzystaniem metod mieszanych dotyczące zachęty finansowych i sieci rówieśniczych w celu promowania chodzenia wśród osób starszych. *Health Education & Behavior*, 41, 43S–50S.
- Laeng, B., Sirois, S. & Gredeback, G. (2012) Pupillometria: okno do przedświadomości? *Perspectives on Psychological Science*, 7, 18–27.
- 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 podstawowych mechanizmów. *Acta Ophthalmologica*, 103, 909–918.
- Liang, X., Wei, S., Li, S.M., Zhao, S., Zhang, Y. & Wang, N. (2024) Wpływ różnych pozycji ciała na ostry ciśnienie wewnątrzgałkowe i reakcje akomodacyjne podczas czytania. *BMC Ophthalmology*, 24, 405.
- Loewenstein, G., Asch, D.A. & Volpp, K.G. (2013) Ekonomia behawioralna ma potencjał, aby zapewnić lepsze wyniki dla pacjentów, ubezpieczycieli i pracodawców. *Health Affairs*, 32, 1244–1250.
- Martinez-Perez, C., Sanchez-Tena, M.A., Sanchez-Gonzalez, J.M., Villa-Collar, C. & Alvarez-Peregrina, C. (2025) Wpływ czasu spędzanego na świeżym powietrzu na równowagę sferyczny i długość osiową w krótkowzroczności dziecięcej: metaanaliza. *Acta Ophthalmologica*, 103, 864–878.
- McClure, S.M., Laibson, D.I., Loewenstein, G. & Cohen, J.D. (2004) Oddzielne układy neuronowe oceniają natychmiastowe i odroczone korzyści finansowe. *Science*, 306, 503–507.
- Meshi, D., Tamir, D.I. i Heekeren, H.R. (2015) Powstająca neurokultura mediów społecznościowych. *Trends in Cognitive Sciences*, 19, 771–782.
- Morgan, I.G., French, A.N., Ashby, R.S., Guo, X., Ding, X., He, M. i in. (2018) Epidemia krótkowzroczności: etiologia i profilaktyka. *Postępy w badaniach nad siatkówką i okiem*, 62, 134–149.
- Muraven, M. & Baumeister, R.F. (2000) Samoregulacja i wyczerpanie ograniczonych zasobów: czy samokontrola przypomina mięsień? *Psychological Bulletin*, 126, 247–259.
- Nahum-Shani, I., Smith, S.N., Spring, B.J., Collins, L.M., Witkiewitz, K., Tewari, A. i in. (2018) Interwencje adaptacyjne typu „just-in-time” (JITAs) w mobilnym zdrowiu: kluczowe elementy i zasady projektowania w zakresie ciągłego wsparcia zachowań zdrowotnych. *Annals of Behavioral Medicine*, 52, 446–462.
- Onnela, J.P. & Rauch, S.L. (2016) Wykorzystanie cyfrowego fenotypowania opartego na smartfonach w celu poprawy zdrowia behawioralnego i psychicznego. *Neuropsychopharmacology*, 41, 1691–1696.
- Pan, W., Morgan, I., Flitcroft, I., Rose, K., Ostrin, L.A., Rosenfield, M. i in. (2025) Konieczność zajęcia się pandemią krótkowzroczności: podsumowanie raportu z globalnego szczytu poświęconego krótkowzroczności w zdrowiu publicznym 2024. *Global Health Research and Policy*, 10, 45.
- Parssinen, O. (2025) Czynniki związane z wysoką częstością występowania krótkowzroczności i jej spadkiem – przegląd historyczny. *Acta Ophthalmologica*, 103, 879–890.
- Patel, M.S., Asch, D.A. & Volpp, K.G. (2015) Urządzenia do noszenia jako czynniki ułatwiające, a nie napędzające zmianę zachowań zdrowotnych. *JAMA*, 313, 459–460.
- Piper, S.K., Krueger, A., Koch, S.P., Mehnert, J., Habermehl, C., Steinbrink, J. i in. (2014) Wielokanałowy system fNIRS do noszenia do obrazowania mózgu w swobodnie poruszających się osób. *NeuroImage*, 85(Pt 1), 64–71.
- Rangel, A., Camerer, C. & Montague, P.R. (2008) Ramy badawcze dla neurobiologii podejmowania decyzji opartych na wartościach. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 545–556.
- Rilling, J.K. & Sanfey, A.G. (2011) Neurobiologia podejmowania decyzji społecznych. *Annual Review of Psychology*, 62, 23–48.
- Rogers, T. & Bazerman, M.H. (2008) Future lock-in: future implementation increases selection of ‘should’ choices. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 106, 1–20.
- Sanfey, A.G., Rilling, J.K., Aronson, J.A., Nystrom, L.E. & Cohen, J.D. (2003) Neuronowe podstawy podejmowania decyzji ekonomicznych w grze ultimatum. *Nauka*, 300, 1755–1758.
- Scholten, M. i Read, D. (2010) Psychologia międzykresowych kompromisów. *Przegląd psychologiczny*, 117, 925–944.
- Schultz, W. (2002) Formalizacja dopaminy i nagrody. *Neuron*, 36, 241–263.
- Schultz, W., Dayan, P. i Montague, P.R. (1997) Neuronowe podłoże przewidywania i nagrody. *Science*, 275, 1593–1599.
- Sherwin, J.C., Reacher, M.H., Keogh, R.H., Khawaja, A.P., Mackey, D.A. i Foster, P.J. (2012) Związek między czasem spędzonym na świeżym powietrzu a krótkowzrocznością u dzieci i młodzieży: przegląd systematyczny i metaanaliza. *Ophthalmology*, 119, 2141–2151.
- Steinberg, L. (2008) Perspektywa neuronauki społecznej w odniesieniu do podejmowania ryzyka przez młodzież. *Developmental Review*, 28, 78–106.
- Van IJzendoorn, M.H. & Bakermans-Kranenburg, M.J. (2012) Powiew zaufania: metaanaliza wpływu donosowego podania oksycyliny na rozpoznawanie twarzy, zaufanie do grupy własnej i zaufanie do grupy obcej. *Psychoneuroendokrynologia*, 37, 438–443.
- Volpp, K.G., Asch, D.A., Galvin, R. & Loewenstein, G. (2011) Przeprojektowanie zachęty zdrowotnych dla pracowników – wnioski z ekonomii behawioralnej. *The New England Journal of Medicine*, 365, 388–390.
- Wang, J., Du, L., Chen, J., Zhang, B., Yang, J., Du, Y. i in. (2025) Randomizowane badanie kliniczne dotyczące skuteczności soczewek okularowych plano z soczewkami w zapobieganiu krótkowzroczności u dzieci przed krótkowzrocznością: protokół badania randomizowanego badania kontrolowanego. *Acta Ophthalmologica*. online przed drukiem.
- Webb, T.L. & Sheeran, P. (2006) Czy zmiana intencji behawioralnych powoduje zmianę zachowania? Metaanaliza dowodów eksperymentalnych. *Psychological Bulletin*, 132, 249–268.
- Wilkinson, T.M. (2013) Nudging i manipulacja. *Political Studies*, 61, 341–355.
- Zak, P.J., Kurzban, R. & Matzner, W.T. (2005) Oksycyocyna jest związana z ludzką wiarygodnością. *Hormones and Behavior*, 48, 522–527.

Jak cytować ten artykuł: Li, D.-L., Guo, T.-H., Grzybowski, A. & Pan, C.-W. (2026) Neuroekonomia i zapobieganie krótkowzroczności: ramy interwencji w zakresie zdrowia publicznego. *Acta Ophthalmologica*, 00, 1–9. Dostępne na stronie: <https://doi.org/10.1111/aos.70100>