

Wersja przedruku czasopisma

Wskaźnik rozciągnięcia dna oka: oparty na centylach pomiar siatkowy krótkowzroczności Dr

Fabian Yii

PII: S2666-9145(26)00100-4

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xops.2026.101162> Odniesienie:
XOPS 101162

Publikacja w: *Ophthalmology Science*

Data otrzymania: 3 grudnia 2025 r.

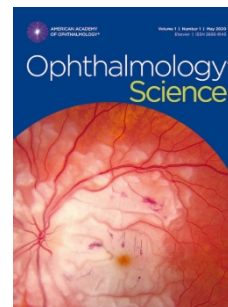
Data poprawek: 27 lutego 2026 r.

Data przyjęcia: 10 marca 2026 r.

Proszę cytować ten artykuł jako: Yii F., Fundus Stretch Index: oparty na centylach wskaźnik siły krótkowzroczności siatkówki, *Ophthalmology Science* (2026), doi: <https://doi.org/10.1016/j.xops.2026.101162>.

Jest to plik PDF artykułu, który po przyjęciu do publikacji został ulepszony, m.in. poprzez dodanie strony tytułowej i metadanych oraz sformatowanie w celu poprawy czytelności. Przed opublikowaniem w ostatecznej formie wersja ta zostanie poddana dalszej redakcji, składowi i recenzji. W związku z tym nie jest to już „manuskrypt przyjęty do publikacji”, ale nie jest to jeszcze ostateczna wersja publikacji; udostępniamy tę wczesną wersję, aby zapewnić artykułowi szybszą widoczność. Należy pamiętać, że do tej wersji mają zastosowanie zasady udostępniania opublikowanych artykułów naukowych firmy Elsevier, patrz: <https://www.elsevier.com/about/policies-and-standards/sharing#4-published-journal-article>. Należy również pamiętać, że podczas procesu produkcji mogą zostać wykryte błędy, które mogą mieć wpływ na treść, a wszystkie zastrzeżenia prawne mające zastosowanie do czasopisma pozostają w mocy.

© 2026 Opublikowane przez Elsevier Inc. w imieniu American Academy of Ophthalmology.



Wskaźnik rozciągnięcia dna oka: oparty na centylach pomiar siatkówki w przypadku krótkowzroczności

Dr Fabian Yii^{1,2,3,4}

1. Klinika Okulistyki im. Roberta O. Curle'a, Instytut Regeneracji i Naprawy, Uniwersytet w Edynburgu, Wielka Brytania
2. Centrum Klinicznych Nauk o Mózgu, Instytut Neuronauki i Badań Sercowo-Naczyniowych, Uniwersytet w Edynburgu, Wielka Brytania
3. Centrum Nauk o Zdrowiu Publicznym, Instytut Ushera, Uniwersytet w Edynburgu, Edynburg, Wielka Brytania
4. Katedra Badań nad Bliźniętami i Epidemiologii Genetycznej, King's College London, Londyn, Wielka Brytania

Korespondencja

Fabian Yii
49 Little France Crescent,
Edynburg EH16 4SB, Wielka
Brytania fabian.yii@ed.ac.uk

Wsparcie finansowe: F. Yii dziękuje za wsparcie finansowe ze strony Rady ds. Badań Medycznych UKRI w formie stypendium przejściowego (MR/W006804/1). Fundator nie miał wpływu na projekt ani przebieg niniejszego badania, ani na decyzję o przesłaniu niniejszego manuskryptu do publikacji.

Konflikt interesów: Autor nie ma żadnych powiązań powodujących konflikt interesów.

Nagłówek: FunSI jako zrozumiały wskaźnik krótkowzroczności oparty na badaniu siatkówki

Dostępność danych: Badania przeprowadzono przy użyciu danych z UK Biobank w ramach projektu o numerze identyfikacyjnym 90655. Naukowcy zainteresowani wykorzystaniem tych danych mogą ubiegać się o dostęp na [stronie ukbiobank.ac.uk/enable-your-research/apply-for-access](https://www.ukbiobank.ac.uk/enable-your-research/apply-for-access). Kod źródłowy jest dostępny bezpłatnie pod adresem <https://github.com/fyii200/FunSI>.

Skróty i akronimy: SER, refrakcja sferyczna równoważna; DL, głębokie uczenie się; FunSI, wskaźnik rozciągliwości dna oka; FRO, przesunięcie refrakcji dna oka; RD, odwarstwienie siatkówki; POAG, pierwotna jaskra z otwartym kątem przesączania; ICD-10, Międzynarodowa Klasyfikacja Chorób, wersja 10; OPCS-4, Biuro Spisów Powszechnych i Badań: Klasyfikacja Operacji Chirurgicznych, wersja 4; IOP, ciśnienie wewnątrzgałkowe; CH, histereza rogówki; HR, współczynnik ryzyka; CI, przedziały ufności

Liczba słów: 3951

Słowa kluczowe: krótkowzroczność, siatkówka, wskaźnik rozciągliwości dna oka, przesunięcie refrakcji dna oka, odwarstwienie siatkówki, jaskra

Artykuł zawiera dodatkowe materiały dostępne wyłącznie online. Następujące elementy powinny pojawić się wyłącznie w wersji online: tabele S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 i S8.

Streszczenie

Cel: Zaproponowanie i ocena potencjału stratyfikacji ryzyka wskaźnika rozciągania dna oka (FunSI), opartego na centylach wskaźnika siatkówkowego, który kwantyfikuje geometryczne odchylenie dna oka od wartości oczekiwanej dla danej refrakcji równoważnej sferycznej (SER).

Projekt: Badanie kohortowe oparte na populacji.

Uczestnicy: Oczy z soczewką własną 25 222 osób dorosłych (SER: od 0D do -12D) z fotografiami dna oka o odpowiedniej jakości na początku badania (2009–2010), indywidualnie powiązane z rutynowo gromadzonymi danymi medycznymi do 2022 r.

Metody: Do oszacowania 5-do 95-centyla 10 bezwymiarowych cech obrazowania dna oka (np. krętość tętnic/żył, nachylenie tarczy nerwu wzrokowego) zastosowano regresję kwantylową, z uwzględnieniem SER. Wskaźnik FunSI obliczono jako sumę pozycji centylowej danego oka w odniesieniu do SER dla wszystkich cech obrazowania, znormalizowaną do przedziału 0–1, tak aby oko konsekwentnie plasujące się w *najgorszym* centylu (5-lub 95, w zależności od kierunku zmiany wraz ze wzrostem krótkowzroczności) dla swojego SER miało wartość 1. Do zbadania związku między wyjściowym wskaźnikiem FunSI a ryzykiem: odwarstwienia siatkówki regmatogennej (RD), z uwzględnieniem wyjściowego SER, wieku, płci, pochodzenia etnicznego, wskaźnika deprywacji Townsenda, cukrzycy, nadciśnienia i urazu oka; oraz jaskry pierwotnej z otwartym kątem przesączania (POAG), z uwzględnieniem tych samych wyjściowych zmiennych towarzyszących (z wyłączeniem urazu oka) oraz ciśnienia wewnątrzgałkowego i histerezy rogówki, zastosowano regresję Coxa.

Główne wyniki i miary: wystąpienie rozszczepu siatkówki typu regmatogennej i pierwotnego otwartego kąta jaskry.

Wyniki: Przeanalizowano łącznie 25 030 i 24 835 osób dorosłych w wieku 40–69 lat bez wcześniejszej historii odwarstwienia siatkówki/pęknięć oraz jaskry dowolnego podtypu. Wskaźniki zdarzeń

(nowe przypadki na 10 000 osobolat) wyniosły 4,9 dla RD regmatogennego i 15,0 dla POAG. Wyższy wyjściowy poziom FunSI wiązał się ze zwiększonym ryzykiem rozwoju RD regmatogennego (skorygowany współczynnik ryzyka na 1 SD [0,09], 1,26; 95% przedział ufności, 1,08–1,48; $P = 0,004$) oraz POAG (1,11; 1,01–1,22; $P = 0,03$). Dodanie wskaźnika FunSI doprowadziło do znacznie wyraźniejszej poprawy wskaźnika zgodności dla modelu RD regmatogennego w porównaniu z modelem POAG.

Wnioski: FunSI to zrozumiałe podejście do charakteryzowania krótkowzroczności na poziomie siatkówki. Dwie osoby mogą mieć podobne wyjściowe czynniki ryzyka, takie jak SER, ale ogólna różnica geometryczna w ich dnie oka, określona ilościowo przez FunSI, może ujawnić różnicę w ich długoterminowym ryzyku wystąpienia chorób zagrażających wzroku.

Wersja przeddruku
czasopisma

Wprowadzenie

1
2
3 Chociaż postępująca krótkowzroczność jest ogólnie towarzyszą jej zmiany w obrazowaniu siatkówki
4 wskazujące na coraz bardziej rozciągnięty wygląd (np. mniej kręte i mniej
5 gęsto rozgałęzionych naczyń),¹⁻³ niektóre dna oka wydają się znacznie bardziej lub znacznie mniej rozciągnięte niż
6 jakiego można by się spodziewać przy ich stopniu krótkowzroczności. Rozbieżności te wynikają częściowo
7 ograniczeniom konwencjonalnych metod pomiaru krótkowzroczności, które skupiają się na wymiarze osiowym
8 wymiary osiowego oka (osi wzrokowej), aby opisać to, co zasadniczo jest procesem trójwymiarowym
9 wymiarowy proces: wzrost gałki ocznej.⁴ Oba oczy mogą mieć identyczny ekwiwalent sferyczny
10 (SER), a mimo to znacznie różnić się kształtem tylnego odcinka, co powoduje
11 różną morfologię siatkówki pozaosiową.⁴
12
13 Ciekawym pytaniem wynikającym z tej krótkiej dyskusji jest to, czy dane ilościowe
14 z całego dna oka danej osoby można włączyć do SER w celu opracowania
15 bardziej zindywidualizowanego, „siatkówkowego wskaźnika” krótkowzroczności.¹ Jednym z podejść jest wykorzystanie
16 głębokiego uczenia głębokiego (DL) do przewidywania SER bezpośrednio na podstawie kolorowej fotografii dna oka. Założeniem jest
17 że, zakładając dobry kompromis między odchyleniem a wariancją, model DL będzie miał bardziej ujemny
18 błąd prognozy w przypadku zastosowania do dna oka, które wydaje się bardziej krótkowzroczne niż wynikałoby to z
19 SER oka.⁵ Jest to analogiczne do tego, jak „wyglądające na starsze” dno oka może wskazywać na
20 przyspieszone starzenie się (wiek biologiczny > wiek chronologiczny).^{6,7} Jedną z takich opartych na DL miar
21 miarą krótkowzroczności jest Fundus Refraction Offset (FRO), który, jak wykazano,
22 wskazuje na przyszłe odwarstwienie siatkówki (RD), niezależnie od wyjściowego SER i
23 istotne zmienne towarzyszące.^{5,8} Jednakże wadą tego podejścia jest jego ograniczona

24 wyjaśnialność, ponieważ miara ta jest wyprowadzana bezpośrednio z surowych zdjęć dna oka, a nie
25 z łatwo interpretowalnych cech obrazowych (np. krętości naczyń).
26
27 Aby poprawić kliniczną wyjaśnialność, pomocne może być rozważenie alternatywnego podejścia, które
28 okazało się bardzo przydatne w pediatrii: wykres wzrostu.⁹ W najbardziej podstawowym ujęciu wykres wzrostu
29 Wykres przedstawia różne centyle danego parametru fizycznego, np. wzrostu, w zależności od
30 wieku. Dziecko znajdujące się na 98. centylu jest na przykład niezwykle wysokie jak na swój wiek
31 (98% dzieci w tym samym wieku jest niższych). Zastępując wzrost cechą obrazowania dna oka
32 i wiek na wskaźnik SER, można by w podobny sposób stworzyć wykres centylowy dna oka, aby
33 określić, na ile dane oko jest typowe lub nietypowe dla swojego SER. Dysponując kilkoma takimi wykresami centylowymi,
34 , z których każda opiera się na innej cechę obrazowania, możliwe jest uzyskanie ogólnego
35 obrazu tego, jak bardzo dna oka różni się ilościowo w porównaniu z innymi oczami o podobnym SER.
36 W niniejszym artykule autor przedstawił zrozumiałą miarę krótkowzroczności siatkówki opartą na tej
37 koncepcji, Fundus Stretch Index (FunSI), i zbadał jego związek w czasie z
38 RD typu regmatogenego i pierwotnej jaskry z otwartym kątem przesączania (POAG), niezależnie od wpływu
39 zmiennych wyjściowych, w tym SER.¹⁰

40

41

42

43

44

45

46

47

Metody

48

49 Uczestnicy badania

50 Niniejsze badanie zostało opisane zgodnie z wytycznymi Strengthening the Reporting of

51 w epidemiologii (STROBE).¹¹ Uczestnicy badania

52 pochodzili z bazy danych UK Biobank Eye and Vision, dużej kohorty osób w średnim wieku

53 (40–69 lat) zrekrutowanych z różnych ośrodków w Anglii, Szkocji i Walii.

54 Ponieważ UK Biobank posiada zezwolenie Centrum Badawczej Komisji Etycznej Regionu Północno-Zachodniego

55 (06/MRE08/65), nie było konieczne uzyskanie oddzielnej zgody komisji etycznej

56 . Wszyscy uczestnicy wyrazili świadomą zgodę, a badanie było zgodne z

57 Deklaracji Helsińskiej.

58

59 Szczegółowy opis tej kohorty można znaleźć w poprzednich publikacjach.¹²

60 ¹³ Krótko mówiąc, w latach 2009–2010 68 508 osób wzięło udział w szeregu podstawowych

61 badaniach fizycznych i okulistycznych, w tym 45-stopniowym badaniu kolorystycznym z plamką żółtą w centrum

62 fotografia dna oka (Topcon 3D OCT-1000 Mark II) oraz autorefrakcja (Tomey RC-

63 5000). Oprócz osobistych wizyt kontrolnych co kilka lat, dane każdej osoby zostały

64 została powiązana z krajowymi rejestrami zgonów (2006–2022 dla wszystkich trzech krajów składowych Wielkiej Brytanii) oraz

65 rutynowo gromadzonymi zbiorami danych dotyczących zdrowia pochodzącymi z finansowanego ze środków publicznych brytyjskiego

66 , czyli National Health Services (NHS). Obejmowały one opiekę podstawową (1938–2016

67 dla Anglii, 1939–2017 dla Szkocji oraz 1948–2017 dla Walii) oraz dane szpitalne

68 dokumentacja przyjęć/proceduralna (1981–2022 dla Szkocji, 1991–2022 dla Walii oraz

69 1997–2022 dla Anglii).

70 **Kryteria kwalifikacyjne**

71 Rysunek 1 przedstawia przepływ uczestników przez poszczególne etapy procesu selekcji

72 . Początkowo uwzględniono 51 086 osób, u których co najmniej jedno oko spełniło wcześniej

73 opisaną i zweryfikowaną ocenę jakości obrazu.^{1,14} Oczy o SER >

74 0D zostały następnie wykluczone, a te, w których występowała co najmniej jedna cecha obrazowania

75 dane, których obliczenia nie powiodły się z powodu nieprawidłowej segmentacji obrazu, zostały dodatkowo usunięte. Podobnie

76 wykluczono oczy znajdujące się poza górnymi i dolnymi 0,1% rozkładu dowolnych cech obrazowych

77 , ponieważ te wartości odstające były spowodowane nieprawidłową segmentacją obrazu podczas kontroli wizualnej

78 kontroli wizualnej

79

80 Ponieważ bardzo niewiele oczu (n=209) miało skrajną krótkowzroczność powyżej 12D, oszacowania centylowe (opisane

81 w następnym podrozdziale) nie mogły być uzyskane precyzyjnie powyżej tego poziomu krótkowzroczności;

82 W związku z tym usunięto te oczy. Aby wykluczyć wpływ pseudofakii,

83 autor wykluczył również osoby, które zgłaszały w wywiadzie historię operacji zaćmy/korekcji refrakcji

84 (pola danych UK Biobank 5324 i 5325) lub osoby z 3-cyfrowym kodem zabiegu

85 związany z usunięciem soczewki, oparty na klasyfikacji operacji chirurgicznych Office of Population Censuses and Surveys:

86 Klasyfikacji Operacji Chirurgicznych, wersja 4 (OPCS-4), a mianowicie C71, C72 i C74,

87 przed wizytą wyjściową lub w jej trakcie. Następnie uwzględniono 40 258 oczu należących do 25 222 osób

88 ostatecznie włączono do badania.

89

90 **Wskaźnik rozciągnięcia dna oka oparty na centylach**

91 Szereg cech obrazowania dna oka obliczono przy użyciu zautomatyzowanych procedur

92 opisanych w poprzednich pracach.^{1,15} Aby złagodzić optyczny wpływ powiększenia okulistycznego

93 oraz w celu uniknięcia zakładania konkretnej konstrukcji aparatu (np. telecentryczności) lub rozdzielczości (mm
94 na piksel),¹⁶ przy obliczaniu uwzględniono wyłącznie bezwymiarowe cechy obrazowania
95 FunSI. Cechy te (n=10) podsumowano w tabeli 1, a ich szczegółowy opis
96 w innym miejscu.^{1,15}

97

98 Do oszacowania $5\cdot$ do

99 95 centyla (w odstępach co 5 centyli) każdej cechy obrazowej, z uwzględnieniem SER i

100 wykorzystując dane z jednego losowo wybranego oka, gdy dostępne były dane z obu oczu danej osoby

101 . Jak pokazano na rysunku 2, dało to 10 wykresów centylowych (po jednym na obrazowanie

102 (funkcja), z których każda zawiera 19 krzywych centylowych. Kluczową zaletą regresji kwantylowej jest to,

103 to, że nie zakłada ona niczego na temat rozkładu warunkowego zmiennej zależnej

104 zmiennej zależnej, w przeciwieństwie do mniej elastycznej półparametrycznej metody Lambda-Mu-Sigma.

105

106 Wskaźnik FunSI dla każdego z 40 258 kwalifikujących się oczu obliczono poprzez zsumowanie jego pozycji centylowej
SER

107 w 10 wykresach centylowych zgodnie z równaniem 1, a następnie min-

108 maksymalna normalizacja tej sumy do przedziału 0–1 zgodnie z równaniem 2. Wartość FunSI wynosząca 0,5

109 wskazywałby zatem na „przeciętny” wygląd dna oka, biorąc pod uwagę SER, podczas gdy dno oka

110 konsekwentnie plasował się w najgorszym centylu we wszystkich cechach obrazowania, miałby FunSI

111 wynoszącą 1. Dla każdej cechy obrazowej najgorszym centylem był albo $5\cdot$ albo 95 centyl,

112 w zależności od kierunku zmiany tej cechy wraz ze wzrostem krótkowzroczności. Na przykład

113 najgorszym centylem dla krętości tętnic był 5 centyl ponieważ krętość zazwyczaj

114 zmniejszała się wraz z krótkowzrocznością, a w przypadku wklęsłości tętnic było odwrotnie.¹

115

116 **[1]** $Cent_{sum} = Cent_{wkł\acute{e}stwo\ t\acute{e}tnic} + Cent_{wkł\acute{e}stwo\ \acute{z}yl} + Cent_{DFD:DML} + Cent_{nachylenie\ tarczy} + (1 - Cent_{FD\ t\acute{e}tnic}) + (1 -$

117 $(1 - Cent_{FD}) + (1 - Cen_{AVR}) + (1 - Cen_{kr\acute{e}t\acute{o}ść\ t\acute{e}tnic}) + (1 - Cen_{kr\acute{e}t\acute{o}ść\ \acute{z}yl}) + (1 - Cen_{absolutne\ skr\acute{e}cenie\ dysku})$

118 **[2]** $FunSI = (Cent_{sum} - 0,5) / 9$

119

120 Gdzie $Cent$ oznacza pozycję centylową w ułamku dziesiętnym (np. 0,5 dla 50-centyla),

121 określonej poprzez zidentyfikowanie krzywej centylowej najbliższej obserwowanej wartości danego

122 cechy obrazowej (ograniczonej do 5 i 95-centyla); $DFD:DML$ oznacza stosunek

123 stosunek odległości między tarczą a dołkiem do długości osi głównej tarczy; FD oznacza wymiar fraktalny; a AVR

124 oznacza współczynnik tętniczo-żylny. Ponieważ 5- centyl (0,05) odpowiadał najgorszemu

125 centyl dla FD tętniczo-żylnego, AVR , krętości tętniczo-żylny i bezwzględnego skręcenia tarczy,

126 odjęcie od 1 centyla odpowiadającego tym cechom obrazowym zapewniło, że $FunSI$

127 bliższy 1 odzwierciedlał siatkówkę o większej krótkowzroczności strukturalnej. Rysunek 3 przedstawia kilka przykładów

128 oczu o podobnym SER, ale różnym $FunSI$.

129

130 **Zdarzenia będące przedmiotem zainteresowania**

131 Wykorzystując szereg źródeł, w tym wspomniane wcześniej dane z rejestrów NHS oraz kwestionariusze wypełniane na

132 ekranie dotykowym wypełniane na ekranach dotykowych podczas każdej wizyty kontrolnej (historia zgłaszana przez pacjentów),

133 zespół UK Biobank udostępnił datę pierwszego wystąpienia chorób rzadkich/złamań oraz jaskry

134 w polach danych 131178 i 131186.¹⁹ Zostały one jednak

135 przypisano do pierwszych trzech znaków kodów Międzynarodowej Klasyfikacji Chorób

136 w wersji 10 (ICD-10), obejmujące różne podtypy RD/zerw (H33) oraz

137 jaskra (H40). W celu ustalenia przypadków rozszczepu siatkówki typu regmatogennej (H33.0)

138 na polu danych 131178 w celu ustalenia przypadków RD regmatogennej (H33.0),

139 biorąc pod uwagę, że pacjenci z RD regmatogenną prawie na pewno wymagaliby leczenia szpitalnego

140 . W przypadku POAG zastosowano podejście eliminacyjne, definiując ją jako
141 obecność jaskry (H40) zgodnie z polem danych 131186, ale bez: (1) jakichkolwiek kodów ICD-10
142 związanych z pierwotną jaskrą z zamkniętym kątem przesączania (H40.2), jaskra wtórna (H40.3
143 do H40.6), inne jaskry (H40.8) oraz jaskry występujące w przebiegu innych chorób (H42.0 i H42.8);
144 a także (2) wszelkie kody OPCS-4 związane z jaskrą z zamkniętym kątem przesączania, a mianowicie
145 iridosklerotomię (C62.1) oraz iridotomię (C62.2 i C62.3).

146

147 **Grupy ryzyka i okres obserwacji**

148 W przypadku analiz opisanych poniżej populacja zagrożona rozwarstwieniem siatkówki
149 obejmowała osoby z bez wcześniejszej historii RD/pęknięć dowolnego podtypu (np.
150 reumatogenne, trakcyjne, surowicze), poprzez wykluczenie osób z kodem ICD-10 H33
151 (pole danych 131178) zarejestrowane podczas wizyty wyjściowej lub przed nią. Podobnie populacja osób
152 ryzyko POAG obejmowała osoby bez jaskry dowolnego podtypu (w tym jaskry z zamkniętym kątem
153) zarejestrowane podczas wizyty początkowej lub przed nią (kod ICD-10 H40; pole danych
154 131186). Okres obserwacji (czas obserwacji) obejmował okres od wizyty wyjściowej danej osoby
155 (2009–2010) do daty cenzurowania w prawo, zdefiniowanej jako najwcześniejsza z następujących dat: ostatni dzień 2022
156 r.,
157 daty zgonu lub daty utraty kontaktu z powodu emigracji lub wycofania zgody na
158 w celu przyszłego połączenia danych. W przypadku analiz dotyczących rozszczepowej retinopatii rozwarstwowej okres
159 obserwacji został dodatkowo cenzurowany po prawej stronie w momencie operacji zaćmy, biorąc pod uwagę potencjalny efekt zakłócający
160 operacji zaćmy w trakcie obserwacji.²⁰ Aby uwzględnić ryzyko konkurencyjne,
161 został również ocenzurowany po prawej stronie w momencie pierwszego wystąpienia RD nieregmatogennej (w
162 przypadku analizy RD regmatogennej) lub jaskry niezwiązanej z POAG (dla analiz POAG).
163 Żadna osoba nie miała zerowego czasu obserwacji.

163 **Analiza statystyczna (przeżycia)**

164 W wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono na poziomie indywidualnym, ponieważ
 165 nie były dostępne dla poszczególnych zdarzeń, a dane ciągłe uśredniano dla obu oczu
 166 , gdy kwalifikowały się oba oczy danej osoby (o ile nie zaznaczono inaczej).
 167
 168 Do wizualizacji skumulowanej częstości występowania ($[1 - \text{przeżywalność}] \times 100$) każdego zdarzenia w czasie, w podziale według wyjściowego wskaźnika FunSI (podzielonego
 169 na 4 kwantyle dla celów wizualizacji). Zastosowano wielowymiarowe modele regresji Coxa
 170 a następnie wykorzystano do zbadania związku między wyjściową wartością wskaźnika FunSI (zmienna ciągła) a czasem
 171 do wystąpienia każdego
 172 zdarzenia, zdefiniowanego jako czas, jaki upłynął od wizyty wyjściowej do daty pierwszego wystąpienia lub
 173 datą cenzurowania prawostronnego (w zależności od tego, co nastąpiło wcześniej). Należy zauważyć, że wskaźnik FunSI
 174 został znormalizowany do
 175 średnią zerową i wariancję jednostkową we wszystkich modelach, aby oszacowany współczynnik ryzyka (HR) znalazł się
 176 na
 177 mniej stromej i bardziej interpretowalnej skali, tak aby współczynnik ryzyka (HR) równy x oznaczał x-krotny
 178 zmianę wskaźnika ryzyka na każdy 1 odchylenie standardowe (SD) wskaźnika FunSI, a nie
 179 na zmianę o 1 jednostkę wskaźnika (co w sposób nierealistyczny odzwierciedlałoby zmianę w całym
 180 całym teoretycznym zakresie FunSI od 0 do 1). Modele początkowo zakładały zależność liniową
 181 , a następnie zostały rozszerzone o nieliniowe składniki FunSI: wielomian drugiego stopnia
 182 ($\text{FunSI} + \text{FunSI}^2$), a następnie wielomian trzeciego stopnia ($\text{FunSI} + \text{FunSI}^2 + \text{FunSI}^3$).

181

182 **Korekta współzmiennych**

183 Współzmiennie wyjściowe wybrane a priori i uwzględnione w każdym modelu obejmowały
 184 podstawowe/ogólne informacje demograficzne i kliniczne: wiek (zmienna ciągła), płeć (zmienna dwuwartościowa),
 185 SER (zmienna ciągła: moc sferyczna + moc cylindryczna/2), wskaźnik deprywacji Townsenda

186 (ciągły: wartości dodatnie wskazywały na wyższy poziom deprivacji), pochodzenie etniczne (binarne: biała rasa vs
187 niebiała), cukrzyca (logiczna) i nadciśnienie (logiczne). W modelu RD regmatogennej
188 (logiczna) została dodatkowo uwzględniona w modelu RD regmatogennego, podczas gdy ciśnienie wewnątrzgałkowe
189 (IOP) oraz histereza rogówki (CH),²¹ które były zmiennymi ciągłymi
190 zmierzone za pomocą analizatora reakcji oczu Reicherta, zostały dodatkowo uwzględnione w
191 model POAG. Nieracjonalne wartości IOP (0 lub >45 mmHg)²² oraz CH (0 lub >15 mmHg)²³⁻²⁵
192 zostały usunięte (potraktowane jako brakujące), ponieważ najprawdopodobniej wynikały one z
193 błąd pomiaru. W celu uzyskania dalszych informacji na temat
194 każdej zmiennej towarzyszącej

195

196 **Analiza „Leave-one-feature-out”, czułość i analizy podgrup**

197 Aby ocenić względny wpływ każdej cechy obrazowej na wyniki regresji Coxa,
198 FunSI zostało ponownie obliczone przy użyciu metody „leave-one-feature-out” (pomijanie jednej cechy na
199). Dodatkowo przeprowadzono analizy wrażliwości poprzez: (1) wykluczenie przypadków zgłoszonych przez samych
pacjentów
200 i przypadków niezidentyfikowanych na podstawie dokumentacji szpitalnej (analiza ta nie miała zastosowania
201 do RD regmatogennej, ponieważ z definicji wszystkie przypadki miały dokumentację szpitalną); (2)
202 z wyłączeniem osób z mocą cylindryczną >2D, aby wykluczyć potencjalny wpływ
203 krzywizny rogówki (np. spowodowanej stożkiem rogówki); (3) wykluczenie przypadków wystąpienia w ciągu 1 roku
204 od momentu rozpoczęcia badania, aby wykluczyć nieumyślne uwzględnienie przypadków występujących powszechnie w
wyniku
205 potencjalnego opóźnienia między wystąpieniem choroby a dostępnością dokumentacji; (4) wybór
206 danych FunSI i zmiennych towarzyszących z oka o większej krótkowzroczności, gdy kwalifikowały się oba oczy; oraz
207 (5) obniżenie progu wartości odstających dla cech obrazowych (zgodnie z opisem w kryteriach kwalifikacyjnych
208) z 0,1% do 0,01% (co spowodowało wykluczenie mniejszej liczby oczu). Wreszcie, w podgrupie

209 osób, które nie były wcześniej wykorzystywane do szkolenia modelu FRO DL,⁵ uwzględniono wyjściowy FRO
 210 jako dodatkową zmienną towarzyszącą o charakterze ciągłym (analiza podgrup).
 211
 212 Współczynnik inflacji wariancji wynosił <1,2 we wszystkich dopasowanych modelach, co wskazuje na brak dowodów na
 213 wielokolinearności. W przypadku brakujących danych zastosowano podejście oparte na przypadkach kompletnych, gdy
 214 można założyć, że dane są całkowicie losowo brakujące (MCAR), w oparciu o test Little'a
 215 ^{(26),27}. W przeciwnym razie zastosowano wielokrotną (n=10) imputację przy użyciu metody dopasowania średniej
 predykcyjnej
 216 ²⁸. Wskaźnik zgodności (C-index) został wykorzystany do podsumowania
 217 zdolności rozróżniającej u modeli dopasowanych do , przy wyższymi wartościami wskazującymi
 na lepszą
 218 rozróżnialność.²⁹ Wszystkie analizy przeprowadzono w programie R V.4.5.1 (R Core Team, Wiedeń,
 219 Austria), przy użyciu pakietów *quantregGrowth* i *survival* do oszacowania krzywej centylowej
 220 oraz przeżywalność analizy, odpowiednio. Źródło źródło kod jest
 jest dostępny na
 221 <https://github.com/fyii200/FunSI>. Testowanie hipotez było dwustronne, przy czym wartość $P < 0,05$ uznano za
 222 wystarczającym dowodem do odrzucenia hipotezy zerowej.

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

Wyniki

233

234 Charakterystyka wyjściowa i skumulowana częstość występowania

235 W tabeli 2 podsumowano charakterystykę wyjściową populacji zagrożonych

236 RD regmatogennego i POAG. W przypadku RD regmatogennego 25 030 (99,9%) spośród 25 067

237 osób z grupy ryzyka; u 37 osób brakowało danych dotyczących wskaźnika deprywacji Townsenda

238 osoby z indeksem zostały wykluczone ze wszystkich analiz, ponieważ spełniono założenie MCAR ($\chi^2 = 6,4$;

239 $P = 0,79$). W przypadku POAG 23 600 (95,0%) spośród 24 835 osób z grupy ryzyka posiadało kompletne dane;

240 brakujące wartości dla CH (n=1191), IOP (n=750) oraz wskaźnika deprywacji Townsenda (n=37)

241 zostały uzupełnione, ponieważ założenie MCAR nie zostało spełnione ($\chi^2 = 584,4$; $P < 0,001$).

242

243 Średni (SD) okres obserwacji wynosił 12,0 (2,1) dla RD regmatogennego (301 348

244 osobołat) oraz 12,3 (1,6) lat w przypadku POAG (306 179 osobołat). W sumie u 148

245 osób miało nowe przypadki RD regmatogennego w okresie obserwacji, co daje

246 wskaźnik zdarzeń wynoszący 4,9 przypadków na 10 000 osobołat. Liczba nowych przypadków POAG

247 wyniosła 460, co odpowiada wskaźnikowi zachorowalności wynoszącemu 15,0 przypadków na 10 000 osobołat. Spośród

248 tych przypadków POAG 23 zgłoszono samodzielnie, a 437 zidentyfikowano za pomocą innych

249 źródła, w tym 319 na podstawie dokumentacji szpitalnej.

250

251 Skumulowaną częstość występowania każdego zdarzenia w czasie, w podziale według wyjściowego wyniku FunSI, przedstawiono

252 przedstawiono na rysunku 4. W porównaniu z osobami z najniższego kwantyla FunSI, osoby z

253 najwyższym kwantyle FunSI dwukrotnie wyższą skumulowaną częstość występowania RD regmatogennej

254 w ciągu 12 lat (0,8% [95% CI: 0,6% do 1,1%] w porównaniu z 0,4% [0,3% do 0,6%]). Podobnie, 12-

255 skumulowana częstość występowania POAG była ponad dwukrotnie wyższa w najwyższym FunSI
256 kwantyl (2,5% [2,1% do 2,9%]) jest podobny do wartości odnotowanej w najniższym kwantylu FunSI (1,2%
257 [0,9% do 1,4%]).

258

259 **Wielowymiarowa regresja Coxa**

260 Jak pokazano w tabeli 3, wyższy wyjściowy wskaźnik FunSI wiązał się ze zwiększonym ryzykiem
261 rozwoju RD regmatogenego (skorygowany HR na 1 SD [0,09], 1,26; 95% CI, 1,08 do
262 1,48; $p = 0,004$) oraz POAG (1,11; 1,01 do 1,22; $p = 0,03$), nawet po uwzględnieniu wartości wyjściowej
263 zmienne towarzyszące, w tym SER (związki jednoczynnikowe przedstawiono w tabeli S1). Wskaźnik C-
264 dla modelu RD typu regmatogenego bez FunSI wynosił 0,689, wzrastając o 0,017
265 do 0,706 po dodaniu FunSI. Natomiast dodanie FunSI do modelu POAG
266 doprowadziło jedynie do bardzo niewielkiego wzrostu wskaźnika C (+0,003, z 0,804 do 0,807).

267

268 **Dodanie terminów nieliniowych**

269 Żaden z nieliniowych składników FunSI nie był powiązany z ryzykiem wystąpienia
270 RD, niezależnie od tego, czy modelowano je jako wielomian drugiego stopnia ($P = 0,39$ dla FunSI²) czy wielomian
271 trzeciego ($P = 0,55$ dla FunSI² i $P = 0,19$ dla FunSI³). Wystąpiły pewne słabe
272 wskazanie na zależność kwadratową między FunSI a ryzykiem POAG: w modelu wielomianu drugiego
273 stopnia, termin FunSI² był powiązany z ryzykiem choroby (HR, 0,90;
274 95% CI, 0,82–1,00; $p = 0,046$), jednak uwzględnienie tego czynnika nie poprawiło wskaźnika C (0,806,
275 podobnie jak w pierwotnym modelu liniowym).

276

277

278 **Analiza „Leave-one-feature-out”, czułość i analizy podgrup**

279 Wyniki analizy „wyklucz jednej cechy” przedstawiono w tabeli S2. Wyjściowy

280 FunSI pozostawało związane ($P < 0,05$) z ryzykiem RD regmatogennego niezależnie od tego, która

281 cechy obrazowej została usunięta, przy szacowanych współczynnikach ryzyka (HR) w zakresie od 1,19 do 1,30. Dla

282 W przypadku POAG wyjściowy wynik testu FunSI nie był już powiązany z ryzykiem choroby po

283 wyeliminowania *DFD:DML*, *FD tętniczo-żylnego* lub *AVR*, co sugeruje, że cechy te miały

284 nieproporcjonalny wpływ na związek wskaźnika FunSI z ryzykiem POAG.

285

286 Ogólne wnioski — że wyższy wyjściowy wskaźnik FunSI był powiązany ze zwiększonym

287 ryzykiem rozdarcia siatkówki typu regmatogennego i POAG — pozostały niezmiennie po powtórzeniu

288 wielowymiarowej regresji Coxa we wszystkich 5 analizach wrażliwości: (1) wykluczenie samooceny

289 przypadki zgłoszone i pozaszpitalne (tabela S3); (2) wykluczenie osób o mocy cylindrycznej

290 $>2D$ (Tabela S4); (3) wykluczenie przypadków, które wystąpiły w ciągu 1 roku od punktu odniesienia (Tabela

291 S5); (4) analiza danych z oka o większej krótkowzroczności (tabela S6); oraz (5) obniżenie

292 progowi wartości odstających cech obrazowania do 0,01% (Tabela S7).

293

294 W podgrupie zdiagnozowano analizie analizie 104 z 15 954 kwalifikujących się osób miało

295 RD typu regmatogennego, a 335 z 15 754 miało przypadki POAG. Jak pokazano w tabeli S8,

296 wyjściowy wskaźnik FRO (skorygowany współczynnik ryzyka na 1 odchylenie standardowe [0,87D], 0,77; 95% CI, 0,65–0,90; $p = 0,002$) oraz

297 FunSI (1,29; 1,07 do 1,57; $p = 0,009$) były niezależnie związane z ryzykiem

298 rozwoju rozszczepu siatkówki regmatogennego. Wskaźnik C wyniósł 0,679 dla modelu rozszczepu siatkówki regmatogennego

299 bez FRO i FunSI, wzrósł o 0,021 do 0,700 po dodaniu FRO, a

300 wzrósł o kolejne 0,018 do 0,718 po uwzględnieniu FunSI — ogólna poprawa

301 wynoszącą prawie 0,04. W przypadku POAG nie było wystarczających dowodów sugerujących, że współczynnik FRO
(0,91;
302 0,82 do 1,00; P = 0,053) oraz FunSI (1,09; 0,98 do 1,22; P = 0,10) były niezależnie
303 związane z ryzykiem choroby, chociaż zaobserwowano pewne tendencje. W związku z tym
304 zmiany w indeksie C przypisywane FRO (+0,001) i FunSI (+0,001) były
305 praktycznie nieobecne, przy znikomym ogólnym wzroście o 0,002 z 0,796 do 0,798.

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

Wersja przedkorektowa
czasopisma

324 **Dyskusja**

325

326 W niniejszym badaniu przedstawiono FunSI, miarę krótkowzroczności siatkówki, która podsumowuje

327 pozycję oka w centylu specyficznym dla SER w zakresie wyjaśnialnych cech obrazowania dna oka

328 (Tabela 1), gdzie wyższa wartość sugeruje bardziej rozciągnięte dno oka w stosunku do

329 SER oka. Jak wykazano w analizie pierwotnej, osoby o podobnym SER

330 i innymi wyjściowymi czynnikami ryzyka mogą mimo to wykazywać różnice geometryczne w swoich

331 funduszu, zgodnie z podsumowaniem FunSI, co może przekładać się na różnice w ryzyku

332 rozwoju RD regmatogennej (lub, w mniejszym stopniu, POAG) w ciągu kolejnych 12

333 lat.

334

335 W analizie podgrup stwierdzono, że zarówno wyjściowy wskaźnik FunSI, jak i FRO^{5,8} są związane

336 z ryzykiem rozwoju RD regmatogennej, niezależnie od siebie. Rzeczywiście,

337 post hoc regresja liniowa FRO względem FunSI wykazała, że podczas gdy wyższy FunSI był

338 związek ten ($P = 0,01$) z bardziej ujemnym wskaźnikiem FRO (dno oka o wyglądzie wskazującym na większą

krótkowzroczność, jak wnioskował

339 przez DL), siła związku była słaba, gdzie wzrost o 1 odchylenie standardowe w FunSI był powiązany jedynie

340 związany ze zmianą FRO wynoszącą $-0,02$ D (95% CI, od $-0,03$ D do $-0,003$ D). Oba wskaźniki

341 dopełniają się, ponieważ wydają się odzwierciedlać różne informacje siatkówkowe istotne dla

342 krótkowzroczności. Jednakże, gdy w analizie podgrupowej jako zdarzenie uwzględniono POAG, oba

343 Nie stwierdzono związku między FRO i FunSI a chorobą, choć zaobserwowano pewne tendencje

344 . W porównaniu z RD regmatogenną (Tabela 3) związek między

345 FunSI a POAG w analizie pierwotnej również wydawał się słabszy (HR: 1,26 vs 1,11) i

346 bardziej niepewny, przy czym dolna granica 95% przedziału ufności była bliższa wartości zerowej. Ponadto

347 poprawa wskaźnika C przypisywana FunSI była znacznie mniejsza dla
348 model POAG niż model RD typu regmatogenego, zarówno w analizie ogólnej, jak i w analizach podgrup
349 . Podsumowując, dowody potwierdzające, że FunSI (w obecnej postaci) jest
350 niezależny marker ryzyka POAG są stosunkowo słabsze
351
352 Prekursorem rozwarstwienia siatkówki typu regmatogenego jest obecność sił trakcyjnych w obrębie układu szklistkowo-
siatkówkowego
353 działających na siatkówkę neurosensoryczną^{30,31} co, jak wspomniano wcześniej,⁸ może wpływać
354 wygląd dna oka. Nawet jeśli takie siły trakcyjne nie są jeszcze klinicznie widoczne,
355 można już dostrzec oznaki obciążenia spowodowanego wydłużonym w osi, asferycznym (bardziej wydłużonym lub mniej
spłaszczonym)
356 tylnego odcinka, charakterystycznego dla oka krótkowzrocznego, mogą być już wykrywalne, jednak
357 subtelnie, na poziomie pikseli w obrębie dna oka,⁴ zmiany, które mogłyby predysponować oko do
358 RD regmatogenego.³² Objawy obciążenia krótkowzrocznego obejmujące głowę nerwu wzrokowego (np. przechylony
359 i bardziej ukośne ustawienie tarczy) oraz unaczynienia siatkówki (np. zmniejszona FD) są również
360 związane ze zwiększoną podatnością oczu krótkowzrocznych na POAG, w wyniku działania
361 szlaku mechanicznego, szlaku związanego z perfuzją, czy też obu tych szlaków.³³⁻³⁶
362
363 FunSI, a co za tym idzie, FRO, różnią się od SER tym, że są dodatkowymi miarami
364 krótkowzroczności, które są bardziej bezpośrednio związane z cechami strukturalnymi siatkówki.
365 To podkreślenie może wydawać się pedantyczne, ale ściśle pokrywa się z ostatnimi głośnymi
366 oświadczenia konsensusowe zalecające uznanie krótkowzroczności za chorobę, najpierw wydane przez
367 Amerykańskiej Narodowej Akademii Nauk⁽³⁷⁾ a następnie przez Międzynarodową
368 ³⁸. Ta ostatnia grupa robocza określiła jako „kluczową strategię” zmniejszenia
369 globalnego obciążenia krótkowzrocznością, potrzebę zdefiniowania krótkowzroczności nie tylko jako wady refrakcji

370 , ale jako chorobę o cechach fenotypowych, które wpływają na długoterminowe wyniki dotyczące zdrowia oczu.³⁸

371 Ta zmiana paradygmatu stanowi ważny krok w kierunku udoskonalenia stratyfikacji ryzyka w praktyce klinicznej

372 praktyce klinicznej,³⁸ jak niektórzy pacjenci z niską krótkowzrocznością są narażeni na wysokie ryzyko

373 powikłań, znacznie przekraczających typowe dla ich SER, podczas gdy u niektórych pacjentów z wysokim

374 krótkowzroczni nie doświadczają takich powikłań. W praktyce zarówno FunSI, jak i FRO

375 stanowią pierwsze potwierdzenie słuszności koncepcji, które przyczynia się do tej zmiany paradygmatu.

376

377 Wykazana w niniejszym badaniu większa podatność mężczyzn na rozszczepowe odwarstwienie siatkówki (tabela 3) jest

378 zgodna z wcześniejszymi wynikami badań epidemiologicznych.³⁹ Podobnie cukrzyca⁴⁰ i wyższe ciśnienie wewnątrzgałkowe⁴¹ są

379 ważnymi czynnikami ryzyka POAG, a coraz więcej dowodów z badań longitudinalnych wskazuje na niższy CH

380 (odzwierciedlające zmniejszoną zdolność tkanki oka do rozpraszania energii) jako niezależny czynnik ryzyka

381 pojawienia się POAG,⁴² w tym niedawne badanie UK Biobank.⁴³

382

383 Pomimo wykorzystania obszernego zbioru danych populacyjnych wykresy centylowe dna oka

384 zostały opracowane na podstawie kolorowych zdjęć dna oka wykonanych aparatem Topcon. Chociaż

385 można oczekiwać pewnego stopnia możliwości uogólnienia na inne aparaty, biorąc pod uwagę, że uwzględniono jedynie

386 uwzględniono bezwymiarowe cechy obrazu, wymaga to zewnętrznej walidacji w

387 przyszłych pracach. Podobnie, konieczne są dalsze badania w celu ustalenia, czy obecna wersja

388 FunSI jest przenoszalna na inne populacje, biorąc pod uwagę przewagę jednej grupy etnicznej

389 grupy (białych Europejczyków) w brytyjskim banku danych biologicznych UK Biobank. Jako weryfikację koncepcji

390 niniejsze badanie kładzie

391 podstawy dla innych badaczy do opracowania własnych wskaźników FunSI, z możliwością

392 połączenia uzyskanych danych w przyszłości w celu stworzenia międzypopulacyjnych wykresów centylowych dna oka.

392 Kolejnym ograniczeniem jest to, że nadal nie jest jasne, czy FunSI jest niezależną miarą

393 krótkowzroczności, czy też złożonym wskaźnikiem zastępczym długości osiowej (AL) z powodu braku danych
dotyczących AL

394 pomiary w ramach UK Biobank. Oprócz konieczności przeprowadzenia walidacji zewnętrznej oraz

395 korekcie o AL, przyszłe prace mogłyby uwzględniać dodatkowe istotne cechy obrazowania,

396 takich jak stosunek zagłębienia do tarczy oraz stopień mozaikowania, co mogłoby potencjalnie zwiększyć

397 FunSI w zakresie stratyfikacji ryzyka. W przyszłych badaniach podłużnych warto byłoby również

398 zbadać związek między FunSI a ryzykiem krótkowzroczności patologicznej lub

399 krótkowzroczność u dzieci. Kolejnym interesującym kierunkiem badań jest wyjaśnienie potencjalnych

400 związków między wskaźnikiem FunSI, wzrostem, trójwymiarowym kształtem gałki ocznej i objętością gałki ocznej.

401

402 Podsumowując, FunSI jest obiecującym, zrozumiałym wskaźnikiem krótkowzroczności opartym na badaniu siatkówki,
który może

403 uzupełniać FRO w stratyfikacji ryzyka przyszłego rozwarstwienia siatkówki typu regmatogenego — oraz, w mniejszym
stopniu

404 stopniu, POAG — nawet wśród osób o podobnym SER, wieku, płci i innych

405 .

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

Opisy do rysunków

Rysunek 1. Schemat przebiegu badania uczestników.

Rysunek 2. Wykresy centylowe dna oka, po jednym dla każdej cechy obrazowej. Każdy wykres składa się z 19 krzywych centylowych, od 5-centyla (bardzo mała wartość) do 95-centyla (bardzo duża wartość) w odstępach co 5 centyli. Krzywa centylowa odpowiadająca 50-centylowi (mediana) jest zaznaczona na czerwono. DFD, odległość między tarczą a plamką.

Rysunek 3. Przykłady kolorowych zdjęć dna oka o podobnej SER, ale różnym FunSI. SER, refrakcja sferyczna równoważna; FunSI, wskaźnik rozciągnięcia dna oka. Przedrukowano za uprzejmą zgodą UK Biobank ©

Rysunek 4. Skumulowana częstość występowania (obliczona jako $[1 - \text{prawdopodobieństwo przeżycia według Kaplana-Meiera}] \times 100$) odwarstwienia siatkówki typu regmatogennego i pierwotnej jaskry z otwartym kątem przesączania w czasie, w podziale według wyjściowego wskaźnika FunSI (podzielonego na 4 kwantyle dla celów wizualizacji). FunSI, wskaźnik rozciągliwości dna oka.

Podziękowania

F Yii dziękuje za wsparcie finansowe ze strony UKRI Medical Research Council w formie stypendium przejściowego (MR/W006804/1). Niektóre materiały z niniejszego badania zostały zaprezentowane podczas dorocznego spotkania UK Biobank Eye and Vision Consortium w listopadzie 2025 r. (Londyn, Wielka Brytania), Chińskiej Akademii Nauk w grudniu 2025 r. (Hangzhou, Chiny) oraz 41-Kongresu Azjatycko-Pacyficznej Akademii Okulistyki w lutym 2026 r. (Hongkong, Specjalny Region Administracyjny Chin). Autor pragnie podziękować słuchaczom za wnikliwe pytania.

Wersja przeddruku
czasopisma

Bibliografia

1. Yii F, Bernabeu MO, Dhillon B i in. Zmiany w siatkówce związane z przejściem od nadwzroczności do krótkowzroczności: nie wszystkie dioptrie są takie same. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2024;65(5):25.
2. Jonas JB, Spaide RF, Ostrin LA i in. IMI – niepatologiczne zmiany w ludzkiej tkance oka przy krótkowzroczności osiowej. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2023;64(6):5.
3. Yii F, Gibbon S, MacGillivray T. Zmiany sektorowe w bladeści obrzeża siatkówki w różnych wadach refrakcji. *Ophthalmol Sci* 2025;5(3):100705.
4. Yii F, Strang NC, Gibbon S, MacGillivray TJ. Czy cechy dna oka mogą nam coś powiedzieć o trójwymiarowym kształcie oka? *Ophthalmic Physiol Opt* 2025.
5. Yii F, MacCormick IJC, Strang N i in. Odchylenie refrakcji dna oka jako zindywidualizowany biomarker krótkowzroczności. *JAMA Ophthalmol* 2025.
6. Zhu Z, Hu W, Chen R i in. Różnica wieku siatkówki jako biomarker pozwalający przewidywać ryzyko udaru mózgu. *BMC Med* 2022;20(1):466.
7. Zhu Z, Chen Y, Wang W, i in. Związek różnicy wieku siatkówki ze sztywnością tętnic i występowaniem chorób sercowo-naczyniowych. *Stroke* 2022;53(11):3320-8.
8. Yii F, MacCormick IJC, Strang N, et al. Odchylenie refrakcji dna oka jako spersonalizowany biomarker 12-letniego ryzyka odwarstwienia siatkówki. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2025;66(9):1.
9. Cole TJ. Opracowanie norm wzrostu i wykresów wzrostu. *Ann Hum Biol* 2012;39(5):382-94.
10. Haarman AEG, Enthoven CA, Tideman JWL i in. Powikłania krótkowzroczności: przegląd i metaanaliza. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2020;61(4):49.
11. Elm Ev, Altman DG, Egger M i in. Oświadczenie STROBE (Strengthening the reporting of observational studies in epidemiology): wytyczne dotyczące raportowania badań obserwacyjnych. *BMJ* 2007;335(7624):806.
12. Chua SYL, Thomas D, Allen N i in. Profil kohorty: projekt i metody w konsorcjum ds. oczu i wzroku w ramach UK Biobank. *BMJ Open* 2019;9(2):e025077.
13. Sudlow C, Gallacher J, Allen N i in. UK Biobank: ogólnodostępne źródło informacji służące do identyfikacji przyczyn szerokiego spektrum złożonych chorób występujących w średnim i starszym wieku. *PLoS Med* 2015;12(3):e1001779.
14. Fu H, Wang B, Shen J i in. Ocena sieci służących do oceny jakości obrazów siatkówki w różnych przestrzeniach barwnych. W: Shen D, Liu T, Peters TM i in., red. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019*. Cham: Springer International Publishing, 2019.
15. Zhou Y, Wagner SK, Chia MA i in. AutoMorph: automatyczna kwantyfikacja morfologii naczyń siatkówki za pomocą potoku głębokiego uczenia. *Transl Vis Sci Technol* 2022;11(7):12.
16. Yii F, Strang N, Moulson C, i in. Optyczny charakter zmian krótkowzroczności w średnicy naczyń siatkówki. *Ophthalmol Sci* 2025;5(1):100631.
17. Muggeo VMR, Torretta F, Eilers PHC i in. Wybór wielu parametrów wygładzania w kwantylach regresji addytywnej. *Statistical Modelling* 2020;21(5):428-48.
18. Wei Y, Pere A, Koenker R, He X. Metody regresji kwantylowej dla referencyjnych wykresów wzrostu. *Stat Med* 2006;25(8):1369-82.

19. UK Biobank. Pierwsze wystąpienie zdarzeń zdrowotnych określonych za pomocą trzycyfrowego kodu ICD-10. Dostępne na stronie: https://biobank.ndph.ox.ac.uk/showcase/ukb/docs/first_occurrences_outcomes.pdf. 2019.
20. Lois N, Wong D. Odwarstwienie siatkówki po wszczepieniu soczewki. *Surv Ophthalmol* 2003;48(5):467-87.
21. Zimprich L, Diedrich J, Bleeker A, Schweitzer JA. Histereza rogówki jako biomarker jaskry: aktualne spostrzeżenia. *Clin Ophthalmol* 2020;14:2255-64.
22. Chan MPY, Broadway DC, Khawaja AP i in. Jaskra i ciśnienie wewnątrzgałkowe w badaniu EPIC-Norfolk Eye Study: badanie przekrojowe. *BMJ* 2017;358:j3889.
23. Narayanaswamy A, Su DH, Baskaran M, i in. Porównanie parametrów analizatora reakcji oka u chińskich pacjentów z pierwotną jaskrą z zamkniętym kątem przesączania i pierwotną jaskrą z otwartym kątem przesączania. *Arch Ophthalmol* 2011;129(4):429-34.
24. Kaushik S, Pandav SS, Banger A i in. Związek między właściwościami biomechanicznymi rogówki, grubością centralnej części rogówki a ciśnieniem wewnątrzgałkowym w różnych postaciach jaskry. *Am J Ophthalmol* 2012;153(5):840-9.e2.
25. Ayala M. Histereza rogówki u osób zdrowych oraz u pacjentów z pierwotną jaskrą z otwartym kątem przesączania i jaskrą pseudoeksfoliacyjną. *Ophthalmic Res* 2011;46(4):187-91.
26. Tierney N, Cook D. Rozszerzenie zasad Tidy Data w celu ułatwienia eksploracji brakujących danych, wizualizacji i oceny imputacji. *Journal of Statistical Software* 2023;105(7):1-31.
27. Roderick JAL. Test całkowitej losowości braków dla danych wielowymiarowych z brakującymi wartościami. *Journal of the American Statistical Association* 1988;83(404):1198-202.
28. van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K. mice: wielowymiarowa imputacja za pomocą łańcuchowych równań w języku R. *Journal of Statistical Software* 2011;45(3):1-67.
29. Uno H, Cai T, Pencina MJ i in. O statystyce C w ocenie ogólnej adekwatności procedur prognozowania ryzyka przy wykorzystaniu danych dotyczących przeżycia z cenzurą. *Stat Med* 2011;30(10):1105-17.
30. Mitry D, Fleck BW, Wright AF i in. Patogeneza odwarstwienia siatkówki typu regmatogennej: predysponująca anatomia i biologia komórkowa. *Retina* 2010;30(10):1561-72.
31. Ghazi NG, Green WR. Patologia i patogeneza odwarstwienia siatkówki. *Eye (Lond)* 2002;16(4):411-21.
32. Lakawicz JM, Bottega WJ, Fine HF, Prenner JL. O mechanizmach krótkowzroczności i jej wpływie na odwarstwienie siatkówki. *Biomech Model Mechanobiol* 2020;19(2):603-20.
33. Wang YX, Panda-Jonas S, Jonas JB. Anatomia głowy nerwu wzrokowego w krótkowzroczności i jaskrze, w tym strefy parapapilarne alfa, beta, gamma i delta: histologia i cechy kliniczne. *Prog Retin Eye Res* 2021;83:100933.
34. Tan NYQ, Sng CCA, Ang M. Zmiany w tarczy nerwu wzrokowego związane z krótkowzrocznością i ich rola w jaskrze. *Curr Opin Ophthalmol* 2019;30(2):89-96.
35. Benavente-Perez A. Dowody na udział układu naczyniowego w krótkowzroczności: przegląd. *Front Med (Lausanne)* 2023;10:1112996.
36. Chan KKW, Tang F, Tham CCY i in. Układ naczyniowy siatkówki w jaskrze: przegląd. *BMJ Open Ophthalmol* 2017;1(1):e000032.
37. Narodowa Akademia Nauk, Inżynierii i Medycyny. Krótkowzroczność: przyczyny, profilaktyka i leczenie coraz powszechniejszej choroby. Waszyngton: The National Academies Press, 2024; 374.

38. Eppenberger LS, Davis A, Resnikoff S i in. Kluczowe strategie zmniejszania globalnego obciążenia krótkowzrocznością: konsensus z międzynarodowego szczytu poświęconego krótkowzroczności. Br J Ophthalmol 2025;109(5):535-42.
39. Mitry D, Charteris DG, Fleck BW i in. Epidemiologia odwarstwienia siatkówki regmatogennej: różnicowanie geograficzne i powiązania kliniczne. Br J Ophthalmol 2010;94(6):678-84.
40. Zhou M, Wang W, Huang W, Zhang X. Cukrzyca jako czynnik ryzyka jaskry z otwartym kątem przesączania: przegląd systematyczny i metaanaliza. PLoS One 2014;9(8):e102972.
41. Coleman AL, Miglior S. Czynniki ryzyka wystąpienia i progresji jaskry. Surv Ophthalmol 2008;53 Suppl1:S3-10.
42. Susanna CN, Diniz-Filho A, Daga FB i in. Prospektywne badanie podłużne mające na celu zbadanie histerezy rogówki jako czynnika ryzyka pozwalającego przewidzieć rozwój jaskry. Am J Ophthalmol 2018;187:148-52.
43. Yun JS, Jung SH, Jung SM i in. Histereza rogówki jako biomarker rozwoju jaskry u pacjentów z krótkowzrocznością: badanie prospektywne oparte na danych z UK Biobank. Br J Ophthalmol 2025;109(9):997-1004.

Wersja przedrukowa
czasopisma

Tabela 1. Opis każdej bezwymiarowej (bezejednostkowej) cechy obrazowania dna oka wykorzystanej do wyznaczenia wskaźnika rozciągliwości dna oka. Więcej informacji na temat poszczególnych cech obrazowania można znaleźć w publikacji Yii i in.¹

Cechy dna oka	Opis
Fraktalny wymiar tętnic	Złożoność tętniczek siatkówki. Wyższe wartości wskazują na zwiększoną złożoność (większa gęsto rozgałęzione). Zazwyczaj zmniejsza się wraz z krótkowzrocznością.
Wymiar fraktalny żył	Złożoność żyłek siatkówki. Wyższe wartości wskazują na zwiększoną złożoność (większa gęsto rozgałęzione). Zazwyczaj zmniejsza się wraz z krótkowzrocznością.
Współczynnik tętniczo-żylny siatkówki	Stosunek ekwiwalentu tętniczek centralnych siatkówki do ekwiwalentu żyłek centralnych. Wyższe wartości wskazują na <i>względne</i> poszerzenie tętniczek. Zazwyczaj zmniejsza się wraz z krótkowzrocznością.
Krętość tętnic	Krętość tętniczek siatkówki. Wyższe wartości wskazują na większą krętość tętniczek. Zazwyczaj zmniejsza się wraz z krótkowzrocznością.
Krętość żył	Krętość żyłek siatkówki. Wyższe wartości wskazują na bardziej kręte. Zazwyczaj zmniejsza się wraz z krótkowzrocznością.
Wklęsłość tętnic	Paraboliczny przebieg głównej łuku tętnic skroniowych. Wyższe wartości wskazują na zwiększoną wklęsłość (łuk tętniczy wygina się bardziej do wewnątrz w kierunku plamki). Zazwyczaj wzrasta wraz z krótkowzrocznością.
Wgłębienie żylny	Paraboliczny przebieg głównej łuku żylny skroniowego. Wyższe wartości wskazują na zwiększoną wklęsłość (łuk żylny wygina się bardziej do wewnątrz w kierunku plamki). Zazwyczaj wzrasta wraz z krótkowzrocznością.
Stosunek odległości tarczy do dołka żółtego do długości osi głównej tarczy	Stosunek odległości euklidesowej między środkiem tarczy nerwu wzrokowego a plamką żółtą (odległość tarcza-plamka) do *długości osi głównej tarczy nerwu wzrokowego. Na przykład wartość 3 oznacza, że odległość tarcza-plamka jest trzykrotnie większa od długości osi głównej tarczy nerwu wzrokowego. Zazwyczaj wzrasta wraz z krótkowzrocznością.
Nachylenie tarczy	Stosunek *długości osi głównej tarczy nerwu wzrokowego do *długości osi pomocniczej. Wyższe wartości wskazują na mniej okrągły, bardziej owalny wygląd tarczy nerwu wzrokowego. Zazwyczaj wzrasta wraz z krótkowzrocznością.
Absolutne skrócenie tarczy (znane również jako orientacja tarczy)	Absolutny kąt między osią poziomą obrazu przechodzącą przez środek ciężkości tarczy nerwu wzrokowego a *długością osi głównej tarczy nerwu wzrokowego (zakres od 0° do 90°). Tarcza nerwu wzrokowego zorientowana pionowo będzie miała wartość 90°. Zazwyczaj zmniejsza się (mniej pionowa orientacja) wraz z krótkowzrocznością.

*Na podstawie najlepiej dopasowanej elipsy

Tabela 2. Charakterystyka wyjściowa uczestników uwzględnionych w analizach przeżywalności. Zmienne ciągłe przedstawiono jako średnią (odchylenie standardowe), a zmienne kateryczne jako n (%).

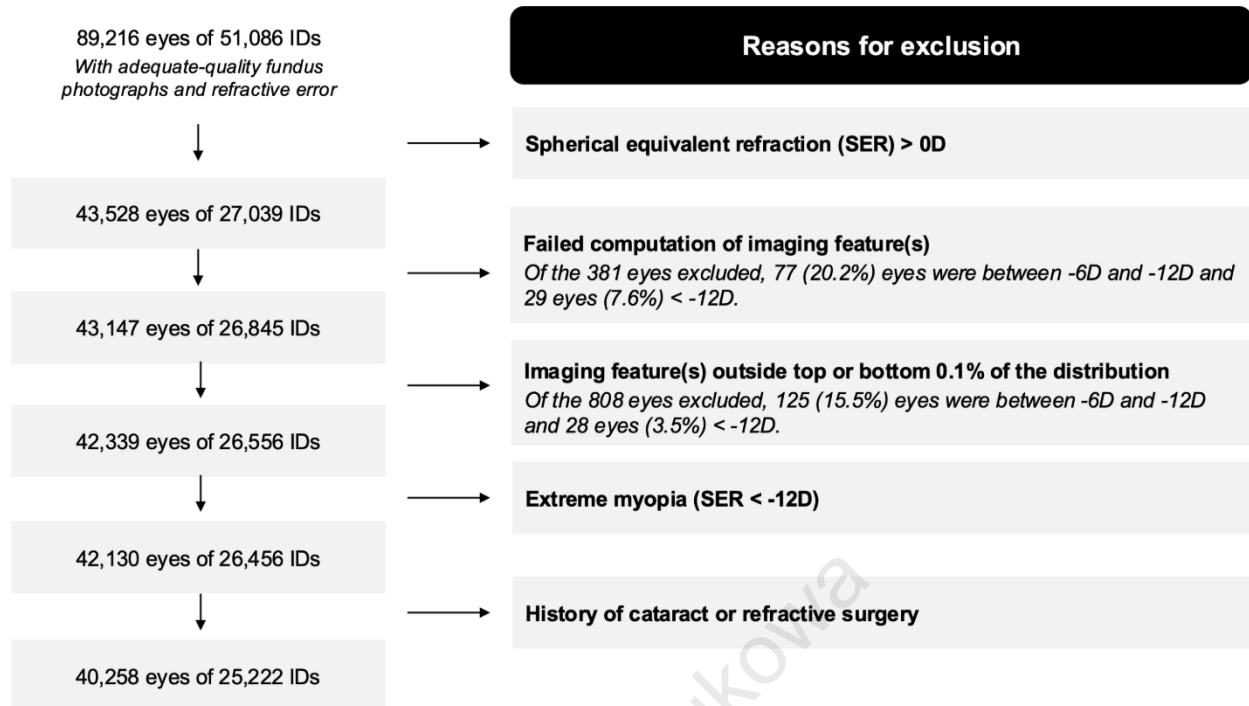
Charakterystyka	RD regmatogenna (n=25 030)	Pierwotna jaskra z otwartym kątem przesączenia (n=24 835)
Wiek (lata)	54,3 (8,1)	54,3 (8,1)
Kobiety	13 513 (54,0)	13 430 (54,1)
Białe	22 742 (90,9)	22 572 (90,9)
SER (dioptria)	-2,12 (2,23)	-2,12 (2,23)
FunSI	0,50 (0,09)	0,50 (0,09)
Wskaźnik deprivacji Townsenda	-1,03 (2,95)	-1,04 (2,95)
Cukrzyca	1107 (4,4)	1080 (4,3)
Nadciśnienie	5502 (22,0)	5440 (21,9)
Uraz oka	124 (0,5)	/
Ciśnienie wewnątrzgałkowe (mmHg)	/	15,9 (3,5)
Histereza rogówki (mmHg)	/	10,5 (1,7)

RD, odwarstwienie siatkówki; SER, refrakcja sferyczna równoważna; FunSI, wskaźnik rozciągliwości dna oka

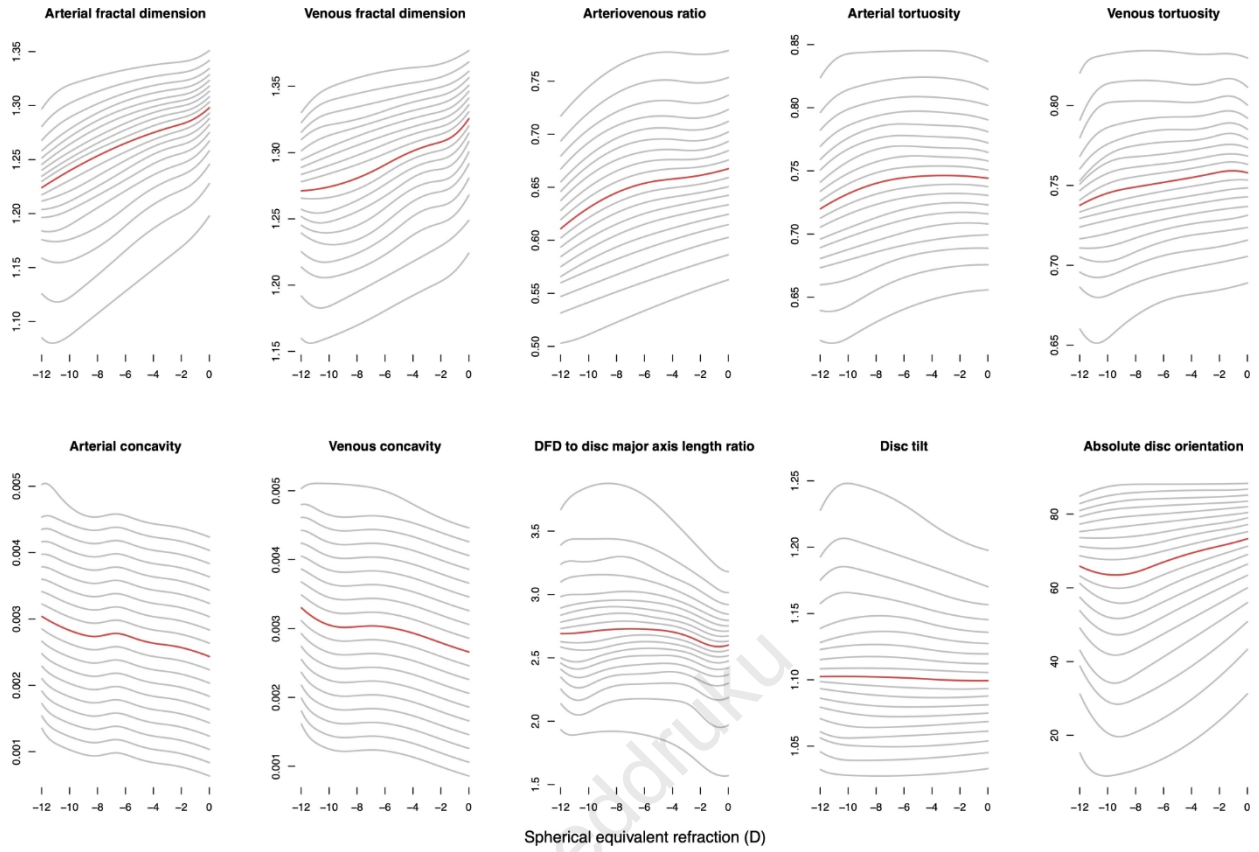
Tabela 3. Skorygowany związek wyjściowego wskaźnika FunSI i zmiennych towarzyszących z każdym zdarzeniem (wielowymiarowa regresja Coxa).

Zmienne wyjściowe	RD regmatogenne (n=25 030)		Pierwotna jaskra z otwartym kątem przesączania (n=24 835)	
	Skorygowany współczynnik ryzyka (95% CI)	P	Skorygowany HR (95% CI)	P
SER na 1 dioptrię	0,81 (0,77 do 0,85)	<0,001	0,93 (0,89 do 0,96)	<0,001
FunSI, na 1 SD (0,09)	1,26 (1,08 do 1,48)	0,004	1,11 (1,01 do 1,22)	0,03
Wiek, na 1 rok	1,00 (0,98 do 1,02)	0,83	1,07 (1,05 do 1,08)	<0,001
Płeć męska	1,89 (1,35 do 2,63)	<0,001	1,14 (0,95 do 1,38)	0,16
Wskaźnik deprywacji Townsenda wskaźnik, na 1 jednostkę	0,97 (0,92 do 1,03)	0,39	0,99 (0,96 do 1,02)	0,55
Biała grupa etniczna	1,22 (0,63 do 2,35)	0,56	0,66 (0,48 do 0,90)	0,01
Cukrzyca	1,05 (0,48–2,30)	0,89	1,58 (1,12 do 2,22)	0,009
Nadciśnienie	1,06 (0,71 do 1,57)	0,78	1,12 (0,91 do 1,38)	0,27
Uraz gałki ocznej	2,35 (0,58 do 9,50)	0,23	/	/
Ciśnienie wewnątrzgałkowe, na 1 mmHg	/	/	1,21 (1,19 do 1,23)	<0,001
CH, na 1 mmHg	/	/	0,91 (0,86 do 0,96)	0,001

RD, odwarstwienie siatkówki; HR, współczynnik ryzyka; CI, przedziały ufności; SER, refrakcja ekwiwalentu sferycznego; FunSI, wskaźnik rozciągliwości dna oka; SD, odchylenie standardowe; ciśnienie wewnątrzgałkowe; CH, histereza rogówki



Wersja przeddrukowa
czasopisma



Wersja przedrukowa
czasopisma

FunSI
SER

-3D

-6D

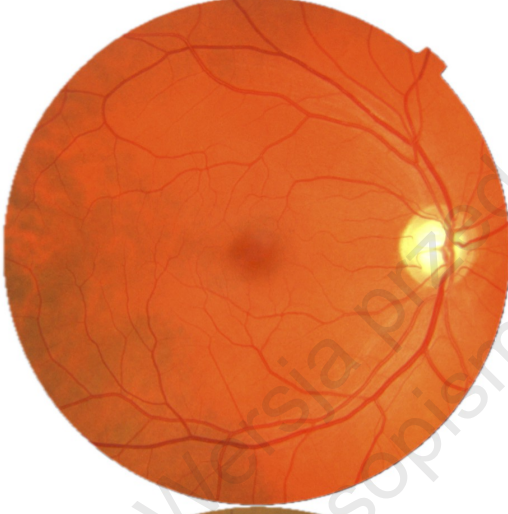
0.29



0.26



0.50



0.51

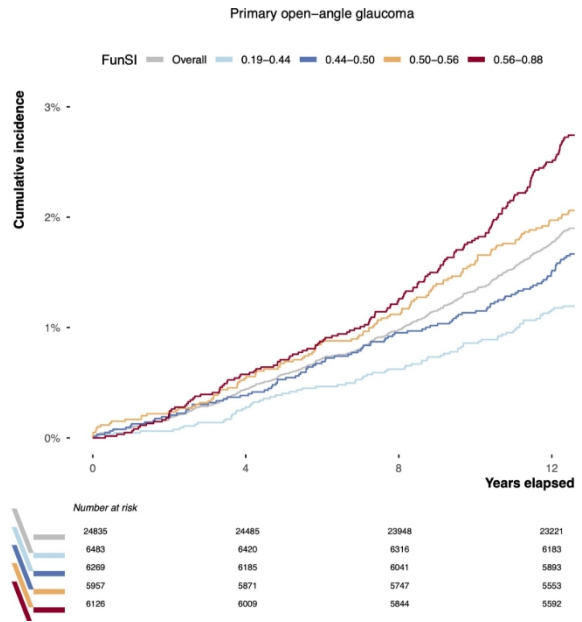
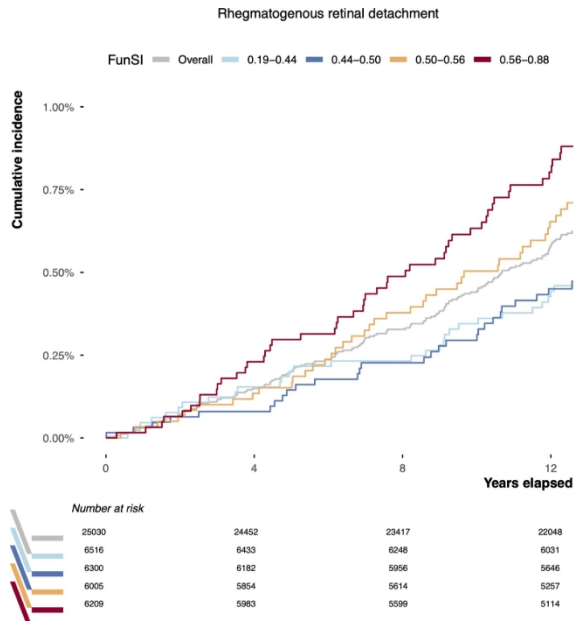


0.70



0.68





Wersja robocza
czasopisma

Wyższy wyjściowy wskaźnik rozciągnięcia dna oka (Fundus Stretch Index), wskazujący na większe rozciągnięcie dna oka, wiązał się ze zwiększonym ryzykiem odwarstwienia siatkówki i jaskry w ciągu 12 lat, nawet po uwzględnieniu znanych czynników ryzyka, w tym stopnia krótkowzroczności.

Wersja robocza
czasopisma