

(24)

Aberracje wyższego rzędu w fizjologicznym układzie optycznym – doświadczenia własne

Higher order aberrations in physiological optical system – own experience

Beata Żelichowska, Marek Rękas, Karolina Krix-Jachym, Marcin Rubajczyk

Z Kliniki Okulistycznej Wojskowego Instytutu Medycznego w Warszawie

Kierownik: prof. dr hab. n. med. Andrzej Stankiewicz

Summary:

Purpose: To assess higher order aberrations in the physiological optical system in relation to pupil diameter and age of people studied.

Material and methods: The study comprised 235 eyes of 122 subjects (67 women and 55 men) (mean age 43.8 ± 15.5 years). Aberrations of the optical system were assessed using a LADARWave aberrometer (Alcon Laboratories). Aberration finding analysis included age, the pupil diameter, and their interrelations. ANOVA, Kruskal-Wallis test, multiple comparison and Ch^2 tests were used to establish the statistical significance, and the correlation coefficient was calculated according to Spearman test.

Results: Basing on the studies performed, we found that the older subjects were the more statistically significant was the increase in the prevalence of higher order aberrations, including coma and spherical aberrations, at the same pupil diameter of 5-6.5 mm. When the relationship between aberrations and the pupil diameter was analyzed in a group of subjects aged 20-40 yrs, it turned out that the bigger the pupil diameter was the more statistically significant was the increase of higher order aberrations, including coma. While assessing the whole group studied we found a statistically significant reverse correlation between the pupil diameter and the subjects' age. Aberrations parameters between age groups 20-40, 40-60 and over 60 y. did not differ significantly.

Conclusions: In the optical system an age-related increase of higher order aberrations is compensated by miosis, which reduces disadvantages of these aberrations and maintains the best optical quality of retinal image.

Słowa kluczowe:

aberracje wyższego rzędu, fizjologiczny układ optyczny, analiza czoła fali, wielomian Zernikego.

Key words:

higher order aberrations, physiological optical system, wavefront analysis, Zernike polynomial.

Wstęp

Prawidłowa budowa i funkcjonowanie poszczególnych elementów układu optycznego oka, w tym w szczególności rogówki i soczewki, są podstawą uzyskania dobrej jakości obrazu siatkówkowego. Główne optyczne zjawiska wpływające na obniżenie optycznej jakości obrazu siatkówkowego to rozproszenie, dyfrakcja oraz aberracje chromatyczne i monochromatyczne oka ludzkiego (1,2). Aberracje monochromatyczne określane są jako odchylenia i zniekształcenia przebiegu światła w układzie optycznym (3). Na wielkość aberracji mają wpływ nieregularności elementów optycznych oka, w tym przede wszystkim asferyczny kształt rogówki, oraz zmiany kształtu i struktury, a w związku z tym współczynnika załamania soczewki. Aberracje mogą być źródłem poważnych ograniczeń jakości widzenia manifestujących się pod postacią niepożądanych zjawisk optycznych, takich jak rozmycie obrazu, gorsze widzenie nocą, dwojenie, olśnienia oraz „halo” (4). Aberracje można podzielić na aberracje niższego rzędu i wyższego rzędu. Rozogniskowanie (defocus) odpowiadające sferycznej wadzie refrakcji oraz astygmatyzm są traktowane jako aberracje niższego (drugiego) rzędu, ponieważ mogą być skorygowane korekcją okularową bądź soczewkami kontaktowymi. Z kolei do podstawowych aberracji wyższego rzędu (ang. higher-order aberrations, HOA) zalicza

się aberracje trzeciego rzędu (coma i trefoil), czwartego rzędu (aberracje sferyczne, wtórny astygmatyzm i tetrafoil), piątego rzędu (wtórne coma) oraz szóstego rzędu (wtórne aberracje sferyczne). Jeszcze do niedawna HOA były określane mianem „astygmatyzmu nieregularnego”. Aberracji wyższego rzędu nie można skorygować za pomocą okularów, szkieł kontaktowych czy tradycyjnej chirurgii laserowej (3). Pomimo stwierdzonej pełnej ostrości wzroku ocenianej na podstawie standardowych tablic Snellena obecność aberracji wyższego rzędu może doprowadzać do spadku jakości obrazu siatkówkowego. Wiadomo, że jakość obrazu siatkówkowego pogarsza się z wiekiem. Za pogorszenie jakości widzenia odpowiedzialne są nie tylko zmiany zachodzące na poziomie neuronalnym, ale również fizjologiczne procesy upośledzające funkcję układu optycznego, w tym przede wszystkim soczewki. Znany jest również wpływ wąskiej źrenicy w warunkach dobrego oświetlenia na poprawę jakości obrazu. Jednakże związek pomiędzy zmianą szerokości źrenicy z wiekiem a jakością widzenia pozostaje nadal kontrowersyjny, zwłaszcza w aspekcie wpływu na wielkość aberracji wyższego rzędu. Obecnie dzięki postępowi technologicznemu stał się możliwy ilościowy pomiar aberracji, wykorzystujący matematyczną analizę przebiegu czoła fal i ich odchyień. Dla pełnego zrozumienia funkcjonowania układu optycznego oka ocena ilościowa

aberracji w odniesieniu do wieku i szerokości źrenicy może dostarczyć cennych informacji.

Cel pracy

Celem pracy jest ocena aberracji wyższego rzędu układu optycznego oka w populacji zdrowych oczu oraz zależności pomiędzy uzyskanymi wynikami a wiekiem badanych i szerokością źrenicy.

Materiał i metoda

Analizie retrospektywnej poddano 235 oczu (117 prawych i 118 lewych) u 122 osób (67 kobiet i 55 mężczyzn) w przedziale wiekowym od 17 lat do 78 lat, średnio $43,8 \pm 15,5$ roku. U każdego pacjenta przeprowadzono badanie okulistyczne, które obejmowało badanie ostrości wzroku do dali, tonometrię aplanacyjną, badanie przedniego odcinka w biomikroskopie, badanie dna oka w obrazie stereoskopowym. Kryteria wykluczające z dalszego badania obejmowały stwierdzoną patologię w badaniu przesiewowym, jak również neuropatię jaskrową, cukrzycę, operacje okulistyczne rogówki, soczewki czy siatkówki, schorzenia neuro-okulistyczne mające wpływ na upośledzenie odruchu źrenicznego na światło oraz przebyte poważne urazy układu wzrokowego. We wszystkich 235 przypadkach przeprowadzono następnie badanie aberrometryczne w jednakowych warunkach oświetlenia z użyciem aberrometru LADARWave (Alcon Laboratories). Aberrometr LADARWave, działający w oparciu o zasadę Hartmanna-Shacka, rzutuje wiązkę światła podczerwonego o długości 820 nm przez źrenicę na siatkówkę. Następnie przez precyzyjny optyczny system mikrosoczewek rejestruje światło odbite od siatkówki, dokonując pomiaru rozkładu zniekształceń w obszarze źrenicy. Dane pomiarowe aberracji wyrażone są jako odchylenia fali świetlnej względem oczekiwanej pozycji w idealnym oku. Czujnik zwoła fali służy do pomiaru wyłącznie aberracji monochromatycznych (5).

Zastosowaną jednostką pomiarową aberracji jest mikrometr (μm). Zakres zniekształcenia rzeczywistej powierzchni względem teoretycznej idealnej powierzchni odzwierciedla wartość pierwiastka średniej kwadratów (ang. root-mean-square, RMS). RMS zdefiniowany jest jako pierwiastek kwadratowy sumy kwadratów poszczególnych elementów piramidy Zernikego według następującego wzoru:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum (Z_n^f)^2}$$

gdzie: Z_n^f – n – tego rzędu współczynnik Zernikego,
 n – indeks dolny oznacza kolejność promieniową,
 f – indeks górny oznacza częstotliwość kątową.

W naszej pracy analizie poddano aberracje wyższego rzędu (HOA) kalkulowane jako pierwiastek kwadratowy sumy kwadratów współczynników aberracji trzeciego rzędu ($Z_3^{-1}, Z_3^1, Z_3^3, Z_3^{-3}$), czwartego rzędu ($Z_4^{-4}, Z_4^{-2}, Z_4^0, Z_4^2$) i piątego rzędu ($Z_5^{-5}, Z_5^{-3}, Z_5^{-1}, Z_5^1, Z_5^3, Z_5^5$). Oceniano również coma (Z_3^{-1} i Z_3^1) oraz aberracje sferyczne (Z_4^0) jako główne składowe aberracji wyższego rzędu. W dalszym etapie przeprowadzono trzy rodzaje analiz.

Analiza A obejmowała porównanie wpływu wieku na wielkość aberracji wyższego rzędu. W tym celu z badanej grupy wyodrębniono pacjentów w trzech przedziałach wiekowych:

- grupa IA – wiek pacjentów ≥ 20 lat i < 40 lat: 29 pacjentów (15 kobiet i 14 mężczyzn), 42 oczu (19 prawych i 23 lewych),
- grupa IIA – wiek pacjentów ≥ 40 lat i < 60 lat: 36 pacjentów (25 kobiet, 11 mężczyzn), 58 oczu (32 prawych, 26 lewych),
- grupa IIIA – wiek pacjentów ≥ 60 lat: 12 pacjentów (6 kobiet, 6 mężczyzn), 19 oczu (10 prawych i 9 lewych).

Kryterium doboru pacjentów do grup IA, IIA i IIIA była szerokość źrenicy $\geq 5,0$ mm i $< 6,5$ mm.

Analiza B obejmowała określenie wpływu szerokości źrenicy na wielkość aberracji wyższego rzędu w jednorodnej grupie wiekowej. Kryterium doboru do grupy był wiek pacjentów ≥ 20 lat i < 40 lat. Z powodu różnych szerokości źrenic następnie grupa została podzielona na: grupę IB – szerokość źrenicy $\geq 4,5$ mm i $< 5,0$ mm: 6 pacjentów (2 kobiety i 4 mężczyzn), 7 oczu (3 prawe i 4 lewe); grupę IIB – szerokość źrenicy $\geq 5,0$ mm i $< 5,5$ mm: 7 pacjentów (5 kobiet i 2 mężczyzn), 8 oczu (3 prawe i 5 lewych); grupę IIIB – szerokość źrenicy $\geq 5,5$ mm i $< 6,0$ mm: 11 pacjentów (6 kobiet i 5 mężczyzn), 12 oczu (6 prawych i 6 lewych); grupę IVB – szerokość źrenicy $\geq 6,0$ mm i $< 6,5$ mm: 18 pacjentów (8 kobiet i 10 mężczyzn), 22 oczu (10 prawych i 12 lewych); grupę VB – szerokość źrenicy $\geq 6,5$ mm i $< 7,0$ mm: 19 pacjentów (8 kobiet i 11 mężczyzn), 22 oczu (12 prawych i 10 lewych) oraz grupę VIB – szerokość źrenicy $\geq 7,0$ mm i $< 7,5$ mm: 15 pacjentów (6 kobiet i 9 mężczyzn), 18 oczu (9 prawych i 11 lewych).

Analiza C dotyczyła wyznaczenia zależności między wiekiem pacjentów a szerokością źrenicy, jak również zależności wielkości aberracji od szerokości źrenicy oraz od wieku bez względu na średnicę źrenicy. Analizę przeprowadzono na całej badanej grupie, która następnie w zależności od wieku została podzielona na trzy grupy. Do grupy IC włączono pacjentów w wieku ≥ 20 lat i < 40 lat (52 pacjentów, 23 kobiety i 29 mężczyzn, 100 oczu – 49 prawych i 51 lewych), do grupy IIC włączono pacjentów w wieku ≥ 40 lat i < 60 lat (46 pacjentów, 33 kobiety, 13 mężczyzn, 89 oczu – 45 prawych, 44 lewych) i do grupy IIIC włączono pacjentów w wieku ≥ 60 lat (24 pacjentów, 11 kobiet, 13 mężczyzn, 46 oczu – 23 prawych i 23 lewych).

Obliczenia statystyczne przeprowadzono, analizując wariancję metodą ANOVA rang Kruskala-Wallisa. W przypadku istotności wyników obliczenia post-hoc przeprowadzono metodą porównań wielokrotnych i z użyciem testu Ch². Do analiz wykorzystano również korelację porządku rang Spearmana.

Wyniki

W badanej grupie 235 oczu aberracje wyższego rzędu stanowiły średnio $33,29 \pm 19,29\%$ całkowitych aberracji układu optycznego oka przy szerokości źrenicy średnio $5,9 \pm 1,1$ mm. Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic średniej wartości aberracji wyższego rzędu pomiędzy grupą badanych kobiet ($0,4 \mu\text{m}$) a grupą badanych mężczyzn ($0,43 \mu\text{m}$) oraz pomiędzy prawym okiem ($0,45 \mu\text{m}$) i lewym okiem ($0,38 \mu\text{m}$) ($p > ,05$). Średnia wartość aberracji w całej badanej grupie wyniosła odpowiednio: $0,23 \pm 0,19 \mu\text{m}$ (coma), $0,16 \pm 0,15 \mu\text{m}$ (aberracje sferyczne) oraz $0,41 \pm 0,32 \mu\text{m}$ (HOA).

Analiza A: Charakterystykę grup IA, IIA i IIIA zestawiono w tabeli I. Grupy były jednorodne pod względem szerokości źre-

nicy ($p > ,05$). Między poszczególnymi grupami zaznaczyła się różnica wieku badanych osób ($p < ,005$).

Aberracje w poszczególnych grupach wiekowych porównano z użyciem ANOVA rang Kruskala-Wallisa, otrzymując następujące wyniki: coma ($p = ,012$), aberracje sferyczne ($p = ,000$) oraz ogółem HOA ($p = ,000$). Na podstawie porównań wielokrotnych stwierdzono znamienne statystycznie wzrost aberracji wyższego rzędu, w tym coma, i aberracji sferycznych wraz

	Żrenica (mm) Pupil	Wiek (lata) Age
Grupa IA (≥ 20 lat i < 40 lat)	5,91 \pm 0,41	30,3 \pm 5,8
Grupa IIA (≥ 40 lat i < 60 lat)	5,63 \pm 0,41	50,0 \pm 5,1
Grupa IIIA (≥ 60 lat)	5,69 \pm 0,36	66,0 \pm 6,0
p*	,129	,000

Tab. I. Charakterystyka badanych grup wiekowych (analiza A).

Tab. I. Characteristics of studied age groups (A analysis).

*ANOVA rang Kruskala Wallisa

z wiekiem badanych osób przy jednorodnej szerokości źrenicy ($5,74 \pm 0,4$). Wyniki analizy zestawiono w tabeli II. Średnie wartości aberracji wyższego rzędu w poszczególnych przedziałach wiekowych przedstawia rycina 1.

Analiza B: Charakterystykę grup IB, IIB, IIIB, IVB, VB i VIB zestawiono w tabeli III. Grupy były jednorodne pod względem wieku ($p > ,05$). Między poszczególnymi grupami zaznaczyła się różnica szerokości źrenicy badanych osób ($p < ,005$).

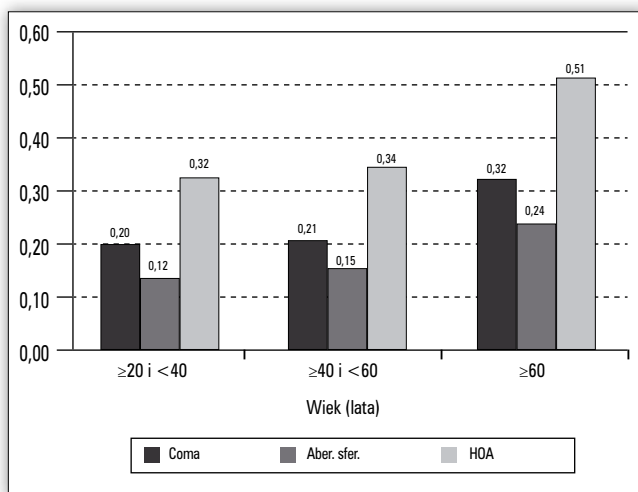
Coma/ Coma	Grupa IIA/ Group IIA	Grupa IIIA/ Group IIIA
Grupa IA	$p < ,05$	$p < ,005$
Grupa IIA		$p < ,005$
Aberracje sferyczne		
Grupa IA	$p < ,005$	$p < ,005$
Grupa IIA		$p < ,005$
HOA		
Grupa IA	$p < ,05$	$p < ,005$
Grupa IIA		$p < ,005$

Tab. II. Wyniki porównań wielokrotnych post-hoc między poszczególnymi grupami wiekowymi.

Tab. II. Results of multiple post-hoc comparison between each age groups.

*Porównania wielokrotne χ^2

Analizując zależność aberracji od szerokości źrenicy w jednorodnej grupie wiekowej (≥ 20 lat i < 40 lat), stwierdzono statystycznie znamienne wzrost wartości aberracji wyższego rzędu, w tym coma wraz ze wzrostem szerokości źrenicy. Z kolei uzyskany wzrost aberracji sferycznych był nieistotny statystycznie. Aberracje w poszczególnych grupach od IB do VIB porównano z użyciem ANOVA rang Kruskala-Wallisa, otrzymując następujące wyniki: coma ($p = ,000$), aberracje sferyczne ($p = ,195$) oraz



Ryc. 1. Aberracje w poszczególnych grupach wiekowych przy jednorodnej średnicy źrenicy.

Fig. 1. Aberrations in individual age groups at the same pupil diameter.

	Wiek (lata) – średnia \pm SD Age	Żrenica (mm) – średnia \pm SD Pupil
Grupa IB ($\geq 4,5$ mm i $< 5,0$ mm)	30,6 \pm 5,1	4,79 \pm 0,19
Grupa IIB ($\geq 5,0$ mm i $< 5,5$ mm)	32,4 \pm 5,5	5,24 \pm 0,11
Grupa IIIB ($\geq 5,5$ mm i $< 6,0$ mm)	30,9 \pm 5,2	5,76 \pm 0,17
Grupa IVB ($\geq 6,0$ mm i $< 6,5$ mm)	29,3 \pm 6,3	6,21 \pm 0,16
Grupa VB ($\geq 6,5$ mm i $< 7,0$ mm)	26,0 \pm 5,5	6,72 \pm 0,16
Grupa VIB ($\geq 7,0$ mm i $< 7,5$ mm)	27,7 \pm 5,9	7,18 \pm 0,15
p*	,174	,000

Tab. III. Charakterystyka badanych grup w zależności od średnicy źrenicy (analiza B).

Tab. III. Characteristics of studied groups depending on the pupil diameter (B analysis).

*ANOVA rang Kruskala Wallisa

HOA ($p = ,000$). Wyniki porównań wielokrotnych poszczególnych grup zestawiono w tabeli IV. Rycina 2 przedstawia rozkład ilościowy analizowanych aberracji w trzech głównych przedziałach szerokości źrenicy.

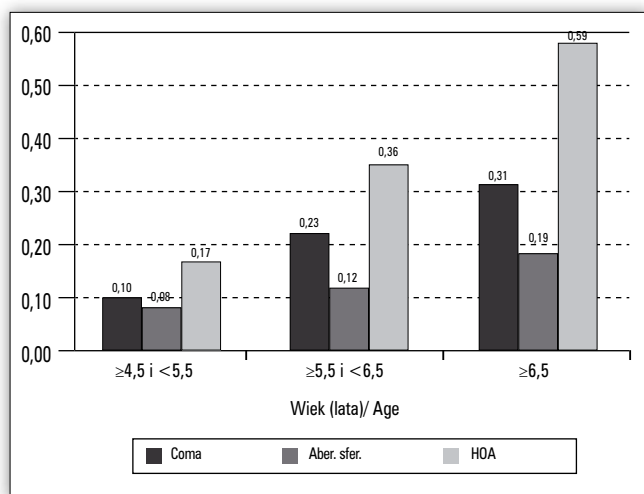
Analizie C poddano 235 oczu (117 prawych i 118 lewych) 122 pacjentów (67 kobiet i 55 mężczyzn) w średnim wieku $43,8 \pm 15,5$ roku. Charakterystykę badanych grup wiekowych przedstawiono w tabeli V. W przeprowadzonej korelacji wieku i szerokości źrenicy według Spearmana uzyskano korelację ujemną ($R = -0,49$) o wysokiej istotności statystycznej ($p < ,005$). Wyniki zestawiono na rycinie 3. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż średnica źrenicy u osób powyżej 60. roku życia jest średnio 1,1 mm węższa niż w młodszej grupie wiekowej (20.-40. rok życia.) i wynosi odpowiednio $5,4 \pm 1,0$ mm oraz $6,5 \pm 1,0$ mm. Zależność wielkości aberracji od szerokości źrenicy przedstawiono na rycinie 4. Porównując wielkość aberracji w trzech kolejnych przedziałach wiekowych, nie stwierdzono istotności statystycznej między grupami IC,

Coma/ Coma	Grupa IIB/ Group IIB	Grupa IIIB/ Group IIIB	Grupa IVB/ Group IVB	Grupa VB/ Group VB	Grupa VIB/ Group VIB
Grupa IB	NS	p<,005	p<,005	p<,005	p<,005
Grupa IIB		p<,005	p<,005	p<,005	p<,005
Grupa IIIB			NS	NS	NS
Grupa IVB				NS	NS
Grupa VB					NS
Aberracje sferyczne					
Grupa IB	NS	NS	NS	NS	NS
Grupa IIB		NS	NS	NS	NS
Grupa IIIB			NS	NS	NS
Grupa IVB				NS	NS
Grupa VB					NS
HOA					
Grupa IB	p<,05	p<,005	p<,005	p<,005	p<,005
Grupa IIB		p<,005	p<,005	p<,005	p<,005
Grupa IIIB			p<,05	p<,005	p<,005
Grupa IVB				p<,005	p<,005
Grupa VB					p<,05

Tab. IV. Wyniki porównań wielokrotnych post-hoc między grupami IB, IIB, IIIB, IVB, VB i VIB w zależności od szerokości źrenicy.

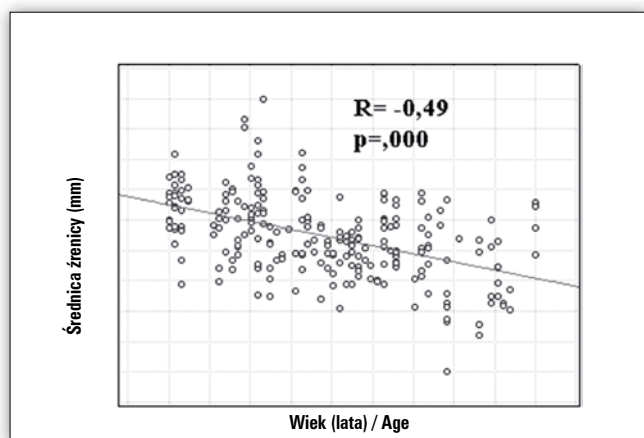
Tab. IV. Results of multiple post-hoc comparison between groups IB, IIB, IIIB, IVB, VB and VIB depending on the pupil diameter.

*Porównania wielokrotne Ch²



Ryc. 2. Aberracje w badanych grupach I-IIB, III-IVB, V-VIB.

Fig. 2. Aberrations of studied groups I-IIB, III-IVB, V-VIB.



Ryc. 3. Korelacja średnicy źrenicy oraz wieku badanych.

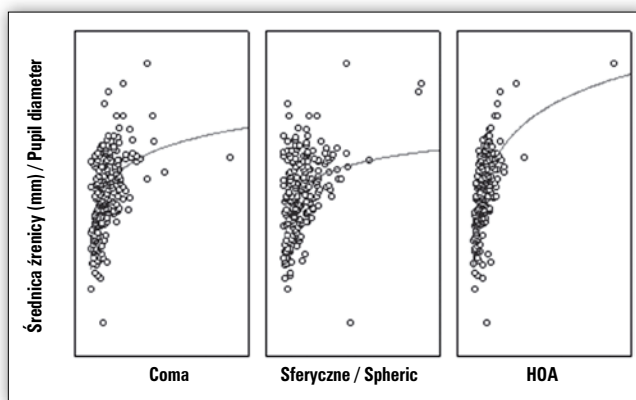
Fig. 3. Correlation between the pupil diameter and the subjects age.

	Źrenica (mm) Pupil	Wiek (lata) Age
Grupa IC (≥ 20 lat i < 40 lat)	6,42 \pm 0,98	28,9 \pm 6,0
Grupa IIC (≥ 40 lat i < 60 lat)	5,62 \pm 0,86	48,7 \pm 5,4
Grupa IIIC (≥ 60 lat)	5,12 \pm 1,16	66,7 \pm 5,9
p*	<,05	<,05

Tab. V. Charakterystyka poszczególnych grup wiekowych (analiza C).

Tab. V. Characteristics of individual age groups (C analysis).

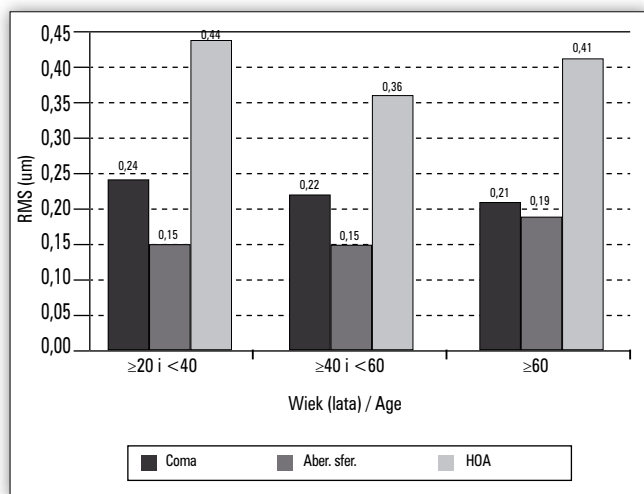
*ANOVA rang Kruskala Wallisa



Ryc. 4. Zależność wielkości aberracji od średnicy źrenicy.

Fig. 4. Relationship between aberrations and the pupil diameter.

IIC i IIIC w zakresie aberracji typu coma ($p=,404$), sferycznych ($p=,151$) i HOA ($p=,477$). Zależność wielkości aberracji od wieku w trzech przedziałach wiekowych: ≥ 20 lat i < 40 lat ($n=100$), ≥ 40 lat i < 60 lat ($n=89$) i ≥ 60 lat ($n=46$), niezależnie od szerokości źrenicy, przedstawiono na rycinie 5.



Ryc. 5. Aberracje w poszczególnych grupach wiekowych niezależnie od szerokości źrenicy.

Fig. 5. Aberrations in individual age groups independently of the pupil diameter.

Omówienie

Za spadek jakości obrazu siatkówkowego z wiekiem odpowiadają zmiany zachodzące w układzie wzrokowym na poziomie neuronalnym, jak również fizjologiczne zmiany w układzie optycznym oka. Dzięki postępowi technologicznemu w ostatnich latach stał się możliwy pomiar jakości optyki ludzkiego oka w zakresie daleko wykraczającym poza wady sfero-cylindryczne. Ze względu na fakt, iż nie wszystkie składowe aberracji w jednakowym stopniu pogarszają optyczną jakość widzenia, w naszej pracy zwróciliśmy szczególną uwagę na dwa elementy wielomianu Zernikego: coma (Z_3^{-1} i Z_3^1) oraz aberracje sferyczne (Z_4^0) jako dominujące składowe aberracji wyższego rzędu. Wiadomo jest, że elementy wielomianu Zernikego zlokalizowane bliżej centralnej części danego rzędu piramidy mają większy wpływ na jakość widzenia niż elementy skrajne. I tak aberracje trzeciego rzędu typu coma, odpowiedzialne za gorsze widzenie nocą i dwojenie jednooczne, mają większy wpływ na pogorszenie jakości obrazu siatkówkowego niż trefoil. Podobnie aberracje czwartego rzędu typu aberracji sferycznych okiem – powodujące olśnienia, „halo” i rozmycie obrazu – w większym stopniu obniżają optyczną jakość widzenia niż tetrafoil (5).

Ocena kliniczna aberracji układu optycznego oka odpowiedzialnych za pogorszenie jakości optycznej obrazu jest przedmiotem intensywnych badań w ostatnich latach, zwłaszcza w zakresie chirurgii refrakcyjnej. Jednakże dotychczas nie określono normy aberracji dla populacji zdrowych oczu i nadal brakuje w piśmiennictwie jednolitego stanowiska na temat bezwzględnej wartości poszczególnych aberracji. Przyczyna odmiennych wyników ilościowych aberracji może wynikać z niejednolitej metodyki badania, obejmującej metodę Hartmanna-Shacka, Tscherninga lub refraktometrię. Kolejnym elementem odzwierciedlającym te różnice jest stosowanie w badaniach przyrządów pomiarowych o zróżnicowanej czułości. Przykładem tego są wyniki uzyskane przez Lianga i wsp., którzy wykazali znamienne statystycznie różnice wartości aberracji wyższego rzędu mierzone trzema różnymi aberrometrami Hartmanna-Shacka (WaveScan, LADARWave oraz Zywave) (6). Ponadto w piśmiennictwie

brakuje także jednolitych danych odnośnie wartości referencyjnych szerokości źrenicy w poszczególnych grupach wiekowych podczas wykonywania badania. W 2001 roku Porter i wsp. analizując aberracje w grupie 109 zdrowych oczu, stwierdzili przypadkowy rozkład aberracji pomiędzy badanymi. Pomimo tego zaobserwowali znamienne korelację pomiędzy prawym i lewym okiem u tego samego badanego (7). Biorąc pod uwagę, co powyżej napisano, trudno odnosić się do oceny bezwzględnych wartości aberracji w odniesieniu do wcześniejszych publikacji.

Stwierdzony w naszej pracy statystycznie istotny wzrost wartości aberracji wyższego rzędu, w tym coma i aberracji sferycznych wraz z wiekiem pacjentów przy jednorodnej szerokości źrenicy, jest zgodny z wynikami przedstawianymi w dostępnym piśmiennictwie (8,9). Takie dane są prezentowane w doniesieniu Wei i wsp., z zastosowaniem aberrometru Zywave (Bausch&Lomb) w grupie 166 oczu w przedziale wiekowym od 21,5 roku do 52,8 roku (średnio $32,1 \pm 6,2$ roku). Autorzy tej pracy wykazali istotny wzrost aberracji sferycznych z wiekiem przy szerokości źrenicy wynoszącej 6 mm (8). Według niektórych autorów całkowite aberracje wyższego rzędu oka ludzkiego wzrastają średnio 3-krotnie pomiędzy 20. rokiem życia a 70. rokiem życia (10,11). W badanym przez nas materiale zaobserwowaliśmy 2-krotny wzrost aberracji pomiędzy grupą wiekową w 20.-40. roku życia. (średni wiek 28,9 roku) a grupą powyżej 60. roku życia. (średni wiek 66,7 roku). W piśmiennictwie dominuje pogląd, iż za wzrost aberracji, zwłaszcza sferycznych, odpowiada zachwianie z wiekiem naturalnej równowagi pomiędzy aberracjami pochodzącymi z rogówki i soczewki. Ciekawym doniesieniem jest praca Glasera i wsp. oceniająca aberracje ludzkiej soczewki w różnym wieku na podstawie pomiarów optycznych przeprowadzonych *in vitro*. W pracy tej stwierdzono, że młoda zdrowa soczewka posiada ujemne sferyczne aberracje, które z wiekiem użytkownika zwiększają się, przechodząc w dodatnie około 40. roku życia pacjenta (10). Z kolei badaniem dostarczającym kompletnych informacji o aberracjach rogówki jest topografia rogówki jako uzupełnienie pomiaru aberracji całkowitych gałki ocznej (12). Dostępne doniesienia potwierdzają brak zależności pomiędzy wiekiem a indukowanymi przez rogówkę dodatnimi aberracjami sferycznymi, co sugeruje, iż wzrost aberracji może być efektem zmian zachodzących w soczewce, a nie w rogówce (8,10,12). W prawidłowym oku u młodych ludzi ujemne sferyczne aberracje naturalnej soczewki częściowo kompensują dodatnie aberracje sferyczne rogówki, redukując tym samym całkowite aberracje układu optycznego. Z wiekiem ta naturalna równowaga ulega fizjologicznej zmianie związanej z procesem starzenia soczewki, co skutkuje wzrostem aberracji soczewki, a tym samym całego układu optycznego oka i utratą jakości optycznej obrazu siatkówkowego (12).

Kolejnym zagadnieniem, które ocenialiśmy w naszej pracy, był wpływ szerokości źrenicy na wielkość aberracji wyższego rzędu w fizjologicznym układzie optycznym w grupie wiekowej w 20.-40. roku życia. W naszym materiale stwierdziliśmy, iż nie wszystkie aberracje są w jednakowym stopniu zależne od średnicy źrenicy. Zaobserwowaliśmy znamienne statystycznie wzrost aberracji wyższego rzędu, zwłaszcza w zakresie coma, wraz ze zwiększeniem szerokości źrenicy, natomiast w zakresie

aberracji sferycznych wzrost był nieistotny. Podobne korelacje pomiędzy wartością aberracji a szerokością źrenicy potwierdzają obserwacje innych autorów. W 2006 roku Awwad i wsp. zaobserwowali wzrost HOA wraz ze wzrostem średnicy źrenicy w przedziale od 3,0 mm do 6,0 mm. Badanie przeprowadzono na grupie 33 oczu z krótkowzrocznością z użyciem niezależnie dwóch aparatów – LADARWave i Visx WaveScan (13). Podobną zależność stwierdzili Wang i wsp. w pracy oceniającej populację 102 oczu z krótkowzrocznością w młodszej grupie wiekowej (średnio $21,86 \pm 4,43$ roku) (14). Autorzy tych prac zaobserwowali wzrost aberracji proporcjonalnie do wzrostu średnicy źrenicy. Uzyskany efekt tłumaczony jest w piśmiennictwie zwiększeniem mierzonej strefy optycznej. Z kolei zwężenie źrenicy, zawężając strumień promieni świetlnych do centralnych części ośrodków optycznych oka, zmniejsza wartość aberracji.

W naszym materiale badawczym zaobserwowaliśmy, iż wraz z wiekiem dochodzi do znamiennego zwężenia średnicy źrenicy (średnio o 1,1 mm) pomiędzy grupą wiekową w 20.-40. roku życia a grupą powyżej 60. roku życia. Analizując całą badaną grupę, niezależnie od szerokości źrenicy, stwierdziliśmy brak istotnych różnic w zakresie aberracji pomiędzy poszczególnymi przedziałami wiekowymi. Zjawisko to najpewniej może wynikać ze zmniejszającej się z wiekiem średnicy źrenicy. Potwierdzeniem tego jest pogląd, iż w oczach z naturalną soczewką starcze zwężenie źrenicy redukuje efekt zwiększonych aberracji optycznych obrazu siatkówkowego jako mechanizm obronny przed pogorszeniem optycznej jakości obrazu siatkówkowego (1,12,15).

Przedstawione w naszej pracy wyniki wskazują na istotną zależność aberracji wyższego rzędu w fizjologicznym układzie optycznym oka od średnicy źrenicy i wieku pacjenta, jak również potwierdzają zmniejszenie średnicy źrenicy wraz z wiekiem pacjenta jako jeden z możliwych mechanizmów kompensujących wzrost aberracji. Uwzględnienie analizy aberracji w ocenie patofizjologii układu optycznego stanowi ogromny krok w kierunku poznania optyki oka ludzkiego w zakresie daleko wykraczającym poza korekcję sfero-cylindryczną, nadając nowe znaczenie pojęciu optycznej jakości widzenia.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wysunięto następujące wnioski:

1. wartość aberracji wyższego rzędu w fizjologicznym układzie optycznym oka zwiększa się wraz z wiekiem,
2. wraz ze wzrostem szerokości źrenicy następuje wzrost aberracji wyższego rzędu,
3. w fizjologicznym układzie optycznym oka wzrost aberracji wyższego rzędu kompensowany jest fizjologicznym zwężeniem średnicy źrenicy z wiekiem pacjenta, wyrównującym niekorzystny efekt tych zjawisk dla zachowania optymalnej jakości optycznej obrazu siatkówkowego.

Piśmiennictwo:

1. Kuroda T, Fujikado T, Ninomiya S, Maeda N, Hirohara Y, Mihashi T: *Effect of Aging on Ocular Light Scatter and Higher Order Aberrations*. J Refract Surg 2002, 18, 598-602.
2. Sarver EJ, Applegate RA: *The Importance of The Phase Transfer Function to Visual Function and Visual Quality Metrics*. J Refract Surg 2004, 20, 504-507.
3. Chalita MR, Finkenthal J, Xu M, Krueger RR: *LADARWave Wavefront Measurement in Normal Eyes*. J Refract Surg 2004, 20, 132-138.
4. Chalita MR, Xu M, Krueger RR: *Correlation of aberrations with visual symptoms using wavefront analysis in eyes after laser in situ keratomileusis*. J Refract Surg 2003, 19, 682-686.
5. Lewis CD, Krueger RR: *Reproducibility of Wavefront Measurements Using the LADARWave Aberrometer*. J Refract Surg 2006, 22, 973-979.
6. Porter J, Guirao A, Cox IG, Williams DR: *Monochromatic aberrations of the human eye in a large population*. J Opt Soc Am 2001, 18, 1793-1803.
7. Liang CL, Juo SHH, Chang CJ: *Comparison of higher-order wavefront aberrations with 3 aberrometers*. J Cataract Refract Surgery 2005, 31, 2153-2156.
8. Wei RH, Lim L, Chan WK et al.: *Higher Order Ocular Aberrations in Eyes With Myopia in a Chinese Population*. J Refract Surg 2006, 22, 695-702.
9. Amano S, Amano Y, Yamagami S, Miyata K, Samejima T, Oshika T: *Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations*. Am J Ophthalmol 2004, 137, 988-992.
10. Mester U, Dillinger P, Anterist N: *Impact of a modified optic design on visual function: Clinical comparative study*. J Cataract Refract Surgery 2003, 29, 652-660.
11. Vilarrodona L, Barrett GD, Johnson B: *High-order aberrations in pseudophakia with different intraocular lenses*. J Cataract Refract Surgery 2004, 30, 571-575.
12. Iseli HP, Jankov M, Bueeler M et al.: *Corneal and total wavefront aberrations in phakic and pseudophakic eyes after implantation of monofocal foldable intraocular lenses*. J Cataract Refract Surgery 2006, 32, 762-771.
13. Awwad ST, El-Kateb M, McCulley JP: *Comparative higher-order aberration measurement of the LADARWave and Visx WaveScan aberrometers at varying pupil sizes and after pharmacologic dilation and cycloplegia*. J Cataract Refract Surgery 2006, 32, 203-214.
14. Wang Y, Zhao K, Jin Y, Niu Y, Zuo T: *Changes of Higher Order Aberration With Various Pupil Sizes in the Myopic Eye*. J Refract Surg 2003, 19(suppl), 270-274.
15. Marcos S: *Are Changes In Ocular Aberrations With Age a Significant Problem for Refractive Surgery?* J Refract Surg 2002, 18, 572-578.

Praca wpłynęła do Redakcji 10.10.2006 r. (881)
Zakwalifikowano do druku 25.03.2007 r.

Adres do korespondencji (Reprint requests to):
lek. med. Beata Żelichowska
ul. Kardynała A. Kakowskiego 8 m.1
04-042 Warszawa