

(16)

Współczesne zastosowania aberrometrii w praktyce okulistycznej

Contemporary applications of wavefront aberrometry in ophthalmology practice

Lucyna Moćko¹, Marek Zajac², Anna M. Roszkowska³, Beata Węglarz¹, Michał Milka¹,
Dariusz Dobrowolski¹, Edward Wylęgała¹

1 Oddział Okulistyki Okręgowego Szpitala Kolejowego w Katowicach

Ordynator: prof. dr hab. n. med. Edward Wylęgała

2 Instytut Fizyki Politechniki Wrocławskiej

Dyrektor: prof. dr hab. Jan Misiewicz

3 Ophthalmology Unit, Department of Surgical Specialities, University of Messina, Italy

Haed: Professor Pasquale Aragona MD, PhD

Streszczenie:

Cele pracy to podsumowanie najnowszych doniesień nt. aberracji, metod i zastosowań badań aberrometrycznych układu optycznego oka oraz ich popularyzacja. Autorzy opisują aktualny stan wiedzy na temat wykorzystania falowej natury światła do oceny układu optycznego oka. Z teorią falową światła łączy się pojęcie frontu falowego, czyli czoła fali – wavefront. W idealnym układzie optycznym odwzorowaniem punktu przedmiotowego jest punkt obrazowy. Aberracje są różnicami między rzeczywistym a idealnym obrazem uzyskiwanym w układzie optycznym. Wyróżnia się dwa typy aberracji: mono- i niemonochromatyczne. Aberrometria określa aberracje monochromatyczne niskiego i wysokiego rzędu. Aberracje niskiego rzędu to niemiarywość i niezborność. Pełniejszy opis aberracji przedstawia skomplikowany system wielomianów Zernike'a. Autorzy przedstawiają najważniejsze typy aberrometrów. Wskazują także na trudności napotymane podczas pomiarów. W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie aberracjami układu optycznego oka i metodami ich badania. Wynika to z coraz częściej podnoszonego wpływu aberracji na jakość widzenia. Wydaje się, że przyszłością optyki okulistycznej jest poszukiwanie metod korygowania aberracji wysokiego rzędu. Badania aberrometryczne autorzy wykonywali aberrometrem KR1W firmy Topcon.

Słowa kluczowe:

front falowy, aberracje monochromatyczne, aberrometria.

Summary:

The aim of the article is to present and summarize the current knowledge of wavefront aberrations, methods and applications of aberrations measurement. Ideal optical system is stigmatic, which means that object point is imaged by optical system into the image point without deformation. Optical system of the eye is not ideal, it has aberrations. Aberrations limitate and determine visual quality. Wavefront aberrometers measure monochromatic low and high order aberrations. Wavefront aberrations are described by Zernike polynomials. More important wavefront sensor types are described in the article. In their practice authors use KR1W Topcon aberrometer. Authors also present difficulties in taking aberrometric measurements. In recent years quality of vision becomes the point of interest for vision scientists. Correction of high order aberrations is the future of optics.

Key words:

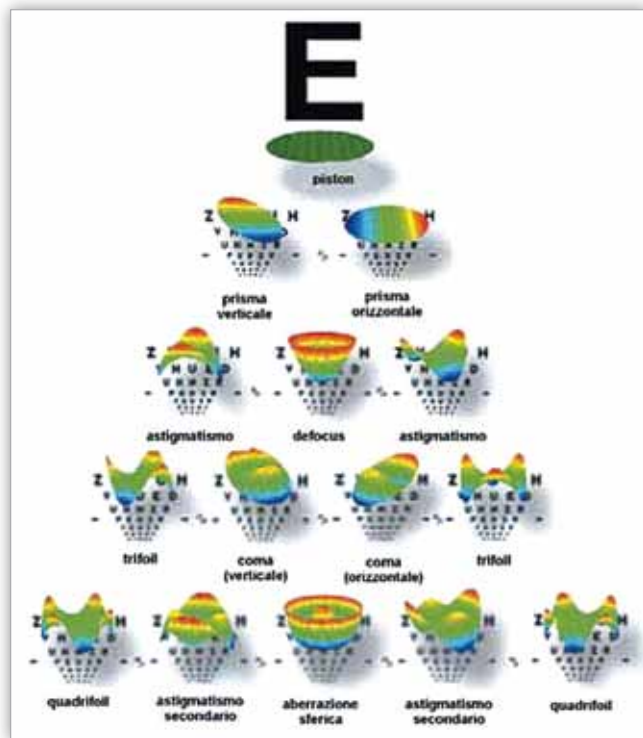
wavefront, monochromatic aberrations, aberrometry.

Idealnym układem optycznym (układem stygmatycznym) byłby taki, w którym obrazem punktu byłby punkt (1). W rzeczywistości każde odwzorowanie obarczone jest aberracjami (wadami odwzorowania) powodującymi, że obrazem punktu jest plama (plamka aberracyjna opisana punktową funkcją rozmycia PSF), co powoduje pogorszenie jakości obrazu – jego rozmycie. Plamkę aberracyjną charakteryzuje się między innymi liczbą Strehla, osiągającą w układzie bezaberracyjnym największą wartość równą 1. O rozmyciu obrazu decyduje szerokość plamki (opisana np. średnicą krążka zawierającego 80% energii plamki) – im szersza plamka, tym gorszy, mniej ostry obraz. Wynika stąd bezpośrednio ograniczenie zdolności rozdzielczej (wynoszącej dla układu optycznego oka około 1 minuty kątowej).

Aberracje odwzorowania można rozumieć dwojako. Jeśli traktujemy światło jako wiązkę promieni, aberracje oznaczają, że promienie wychodzące z układu optycznego nie przecinają się

w jednym punkcie, w którym powinien znajdować się obraz, ale tworzą układ wichrowaty. Mówi się wtedy o aberracjach geometrycznych. Jeśli traktujemy światło jako falę, aberracje oznaczają, że front falowy (czoło fali) wychodzący z układu optycznego nie tworzy powierzchni kulistej. Aberracja falowa to odstępstwo rzeczywistego frontu falowego od frontu idealnego (sfery Gaussa). Odchylenie to może być spowodowane „przyspieszeniem” lub „opóźnieniem” fali w danym miejscu, co przejawia się odchyleniem do przodu lub do tyłu od idealnego frontu falowego. Mówimy w tym wypadku o aberracji frontu falowego (ryc. 1).

Aberrację falową przedstawia się graficznie w postaci barwnej „mapy poziomicowej”, na której kolorami zaznaczone są obszary lokalnego „opóźnienia” lub „przyspieszenia” frontu falowego. Ilościową miarą aberracji jest średniokwadratowe odchylenie frontu falowego – (Root Mean Square – RMS). Jest to pierwiastek średniej wartości kwadratu aberracji falowej. Jest miarą wy-



Ryc. 1. Wielomiany Zernike'a.
Fig. 1. Zernike polynomials.

rażoną w mikrometrach lub długościach fali świetlnej. Parametr ten służy do ilościowego opisu wszystkich rodzajów aberracji.

Klasycznym sposobem opisu aberracji geometrycznych jest ujęcie ogłoszone przez Ludwiga von Seidela w 1856 r., w którym aberracje dzieli się na aperturowe i polowe w zależności od położenia punktu przedmiotowego względem osi układu optycznego. Zwykle bierze się pod uwagę tylko tzw. aberracje III rzędu, do których zalicza się aberrację sferyczną, komę, krzywiznę pola i astygmatyzm oraz dystorsję. Jeżeli przedmiot leży na osi, mamy do czynienia z aberracją aperturową, którą jest aberracja sferyczna. Jest ona niedoskonałością układu optycznego, polegającą na tym, że promienie przyosiowe przecinają oś optyczną w innej odległości od tego układu niż promienie padające na ten układ ponad osią. Aberracja sferyczna może przyjmować wartości ujemne, gdy promienie z części pozaosiowych skupiane są dalej niż promienie z części przyosiowych, i wartości dodatnie, gdy promienie z części obwodowych skupiane są bliżej niż promienie centralne. W obecności aberracji sferycznej obrazem punktu jest krążek, którego środek leży w punkcie odpowiadającym punktowi obrazowemu układu bezaberracyjnego, czyli obrazowi geometrycznemu, gaussowskiemu. Wpływ aberracji sferycznej można znacznie ograniczyć, zmniejszając średnicę przysłony (np. stosując otwór stenopeiczny). W odniesieniu do układu optycznego oka opis Seidla nie jest najodpowiedniejszy. Ze względu na małe rozmiary plamki (macula) jakość odwzorowania przedmiotów leżących poza osią optyczną nie ma wielkiego znaczenia, a więc aberracje polowe nie są przydatne do charakteryzowania układu optycznego oka. Formalnie rzecz biorąc, niemiarowość można także zaliczyć do aperturowych aberracji Seidla, natomiast niezborność jest analogiczna do astygmatyzmu Seidla, lecz jest skutkiem braku symetrii układu odwzorowującego (głównie rogówki), a nie położenia przedmiotu poza osią.

W 1954 r. holenderski fizyk Frits Zernike zaproponował sposób przedstawienia aberracji w postaci sumy wielomianów, zwanych wielomianami Zernike'a, który jest stosowany powszechnie do dziś. Wielomiany Zernike'a układają się w piramidę zgodnie z numeracją rzędu aberracji. W praktyce znaczenie mają aberracje do szóstego rzędu. Rząd zerowy opisuje przesunięcie, czyli człon stały, rząd pierwszy – nachylenie, czyli pryzmatyczność (aberracje rzędów zerowego i pierwszego nie mają wpływu na jakość obrazu). Aberracje drugiego rzędu odpowiadają niemiarowości i niezborności. Kolejne rzędy aberracji zawierają składowe opisywane jako komy, aberracje sferyczne, rozety, łącznie stanowiąc aberracje wyższego rzędu (Higher Order Aberrations – HOA). Opis aberracji danego rzędu powstaje w wyniku dodania poszczególnych wielomianów Zernike'a, które odpowiadają danemu rzędowi (3,4).

Inną miarą jakości odwzorowania jest funkcja przenoszenia kontrastu (Modulation Transfer Function – MTF) (2). Opisuje ona wierność odwzorowania struktur obrazu o różnych częstościach przestrzennych. Składowe o niskich częstościach przestrzennych zawierają „grube” struktury obrazu, a składowe o wysokich częstościach przestrzennych zawierają informacje o jego drobnych szczegółach. MTF opisuje spadek kontrastu składowych obrazu o poszczególnych częstościach przestrzennych.

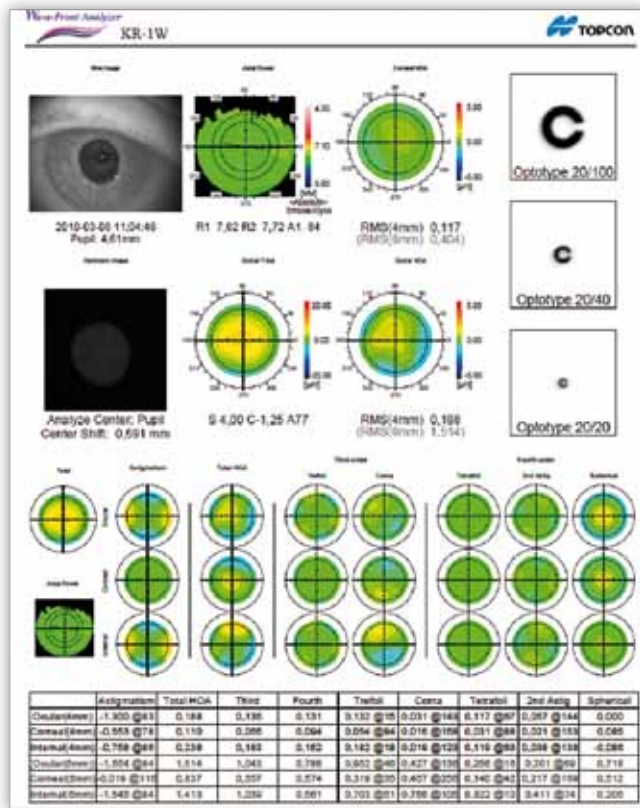
W ostatnich latach XIX wieku do doświadczeń Scheinera wrócił Johannes Hartmann, astrofizyk niemiecki. Na ich podstawie po wprowadzeniu pewnych udoskonaleń opracował on metodę, która umożliwiała badanie aberracji fali wychodzącej. W swojej pracy posłużył się zmodyfikowanym dyskiem Scheinera z licznymi otworami. W ten sposób powstał ekran Hartmanna. W 1970 r. kolejną modyfikację wprowadzili Shack i Platt z Centrum Optycznego Uniwersytetu w Arizonie. Technika służyła początkowo do opracowywania zdjęć Ziemi wykonywanych przez satelity i była zastrzeżona dla wojska. Naukowcy zmodyfikowali dysk Scheinera, tym razem wbudowując mikrosoczewki w otwórki ekranu Hartmanna. Ekran, który powstał w ten sposób, nazwano czujnikiem Shacka (3). Ze względu na zewnętrzne podobieństwo czujnik Hartmanna–Shacka porównywany jest do oka owadów. Ważnym elementem aparatu jest kamera CCD – czujnik frontu falowego, czyli detektor obrazu. Czujnik wychwytuje front falowy i rejestruje obraz utworzony przez układ mikrosoczewek. Przemieszczenie punktów względem siatki odniesienia wskazuje na miejscowe odchylenie frontu falowego.

W krótkim czasie zaobserwowano korzyści, jakie mogą płynąć z zastosowania czujnika Hartmanna–Shacka w okulistyce. Do badania aberracji układu optycznego oka wykorzystuje się wiązkę światła monochromatycznego w zakresie podczerwieni, o długości fali 800 nm do 850 nm. Liczba punktów badanych waha się od kilkuset do kilku tysięcy. Zagęszczenia i rozrzedzenia punktów rejestrowanych przez detektor obrazu wynikają ze zniekształceń czoła fali. Urządzenia działające na zasadzie czujnika Hartmanna–Shacka są najczęściej stosowanymi obecnie aberrometrami (5). Niektóre urządzenia, np. KR1W firmy Topcon, łączą w sobie dwa aparaty – wideokeratoskop i aberrometr. Wideokeratoskop pozwala na precyzyjne śledzenie aberracji rogówkowych dzięki ocenie pierścieni Placido.

Graficznym odzwierciedleniem aberracyjnego frontu falowego jest mapa barwna. Wydruk może zawierać ponadto dane z pomiaru średnicy źrenicy, wartość RMS aberracji rogówkowych,

wewnętrznych i całkowitych ocznych (podane w mikrometrach), a wśród nich miary niemiarkowości, astygmatyzmu, RMS rogówkowych, wewnętrznych i całkowitych HOA, wartości współczynników Zernike'a dla wybranych aberracji. Wszystkie te wartości podane są dla zadanych średnic pola badanego oraz w przypadku źrenicy większych dla średnicy źrenicy badanej. Ponadto wynik może zawierać graficzny obraz funkcji PSF, wartość liczby Strehla oraz informację o MTF. Ciekawym elementem wydruku jest przewidywana ostrość widzenia optotypów 20/100, 20/40 i 20/20. Grupa aberracji rogówkowych, stanowiąca około 80% aberracji całkowitych ocznych, obejmuje aberracje zależne od filmu łzowego i przedniej powierzchni rogówki. Aberracje wewnętrzne to niedoskonałości, które dotyczą tylnej powierzchni rogówki, płynu komory przedniej, soczewki i ciała szklistego (6). Wartości aberracji wewnętrznych związane są z szerokością źrenicy. Miary całkowite oczne obejmują zmiany, które dotyczą łącznie wszystkich elementów optycznych układu optycznego oka. Zaobserwowano zjawisko kompensacji wewnętrznej, polega ono na zachowaniu równowagi między aberracjami rogówkowymi a wewnętrznymi. Aberracje wewnętrzne kompensują częściowo wysokie aberracje rogówkowe, zmniejszając aberracje całkowite oczne. Wybrane modele aberometrów mogą służyć do pomiarów zakresu akomodacji (7) (ryc. 2).

aberracji oka funkcjonującego w świetle niemonochromatycznym. Chociaż aberometry mają wiele zalet, w tym wyważoną konstrukcję, jak wszystkie przyrządy pomiarowe podają wyniki o ograniczonej powtarzalności i obciążone błędem. Uzyskanie pomiarów wiarygodnych i powtarzalnych wymaga znacznego doświadczenia i ogromnej precyzji badającego oraz pełnej współpracy pacjenta. Ważne jest zachowanie stałych warunków zewnętrznych oświetlenia i temperatury, a także stabilnej wilgotności powietrza. Badający napotyka trudności związane z ruchem oka podczas badania (9). Urządzenia zaopatrzone są w odpowiednio dobrane obrazki fiksacyjne, albowiem przesunięcie osi widzenia względem osi optycznej jest źródłem poważnych niedoskonałości. Aberometry zaopatrzone są ponadto w system śledzenia ruchów gałki ocznej. Pomiarów aberometrycznych zależą od akomodacji oka (7,10). Narastanie akomodacji doprowadza do narastania ujemnych wartości aberracji sferycznej. Niektóre aberometry mają funkcję zamglenia, która zmniejsza wpływ akomodacji na pomiary, inne natomiast pozwalają mierzyć akomodację dynamiczną (7). Istotne znaczenie ma pozycja, w jakiej znajdują się powieki pacjenta podczas badania, ponieważ kiedy są zaciśnięte, a szpara powiekowa wąska, dochodzi do narastania aberracji niskiego i wysokiego rzędu. Gdy szpara powiek jest bardzo szeroko rozwarta, zbyt cienki film łzowy powoduje narastanie dodatniej sferycznej HOA. Należy również zwrócić uwagę na zmiany, jakie zachodzą w filmie łzowym bezpośrednio po mrugnięciu. Zaleca się wykonywanie pomiarów zawsze w tym samym czasie po mrugnięciu. Źródłem znacznych zmian HOA u pacjentów z zespołem suchego oka są nieprawidłowości filmu łzowego, z ostatecznym jego przerwaniem (11). U pacjentów z zespołem suchego oka zmniejszenie aberracji niskiego i wysokiego rzędu stwierdzono po podaniu preparatów sztucznych łez oraz po założeniu zatyczek do punktów łzowych (12,13). Zaobserwowano wprost proporcjonalną zależność aberracji od wieku osoby badanej. Dążenie oka dziecięcego do emetropizacji wiąże się z wieloma wzrostowymi zmianami rogówki, soczewki i samej długości gałki ocznej. W okresie do około 20. roku życia dochodzi nie tylko do zmniejszenia aberracji II rzędu typu nadwzroczności, ale także do zmniejszania HOA, a następnie systematycznego ich narastania aż do czasu, gdy pacjent osiągnie dojrzały wiek. U osób starszych zaznaczają się wyższe wartości RMS HOA, zwłaszcza aberracji sferycznej i komy. Uważa się jednak, że wartości te są zbyt małe, żeby zaburzać ostrość wzroku. Ponadto, jak się wydaje, czynnikiem ochronnym może być mniejsza szerokość źrenicy u osób starszych (14,15). Zaćma również ma wpływ na narastanie aberracji wysokiego rzędu układu optycznego oka. Zaćma jądrowa wiąże się z ujemnymi wartościami aberracji sferycznej, korowa natomiast powoduje narastanie aberracji sferycznej dodatniej (16). Prowadzono badania nad wpływem ciśnienia wewnątrzgałkowego i jego wahań dobowych na aberracje. Wykazano niewielkie zmiany aberracji związane z poziomem ciśnienia wewnątrzgałkowego w godzinach popołudniowych, które nie korelują w prosty sposób z wysokością mierzonego ciśnienia wewnątrzgałkowego (8). Podobnie wykazano minimalną okresową zmienność HOA, była ona zależna od częstości oddechu i akcji serca (17).



Ryc. 2. Mapa aberracji rogówkowych – wewnętrznych i całkowitych.
Fig. 2. KR1W Topcon aberometric map of corneal, internal and total aberrations.

Aberometry okulistyczne to urządzenia, które badają bardzo zmienną i niestabilną sferę często niewielkich błędów optycznych. Do tej pory nie określono norm dla aberracji wysokiego rzędu (8). nierozwiązany zagadnieniem jest fakt wykorzystania w aberometrii światła monochromatycznego do badania

Klinicznie aberometry są stosowane m.in. do pomiarów refrakcji układu optycznego oka w przypadkach trudnych.

Badania te wyjaśniają, jaka jest przyczyna pogorszenia się zmierzchowej ostrości wzroku u pacjentów po przebytych zabiegach keratorefrakcyjnych, dostarczają bowiem informacji o stanie aberracji przy różnych średnicach źrenicy. Ocena skurczu i niedomogi akomodacji jest możliwa dzięki obserwacji miar aberracji sferycznej wewnętrznej. Ponadto aberometria jest badaniem, które wykonuje się w diagnostyce ektaзии rogówkowych. W przypadku stożka rogówki i dystrofii brzożnej przezroczystej aberometria wykazuje znacznie wyższe wartości komy o charakterystycznym układzie. Wysokie miary aberracji wewnętrznych pozwalają potwierdzić diagnozę patologii soczewki. Ciekawe jest inne zastosowanie praktyczne aberometrii – jest bowiem wykorzystywana do dynamicznej oceny filmu łzowego w badaniach seryjnych, dzięki obserwacji narastania aberracji rogówkowych pozwala bardzo precyzyjnie określić, jaki jest czas przzerwiania filmu łzowego. Trudnym problemem diagnostycznym jest jednooczne widzenie podwójne. Aberometria umożliwia potwierdzenie podejrzenia i precyzyjne określenie przyczyny patologii – rogówkowej lub soczewkowej. Zdiagnozowanie zaćmy początkowej, która może być przyczyną jednoocznego dwojenia, powinno być wskazaniem do pilnego jej usunięcia z wszczepieniem sztucznej soczewki wewnątrzgałkowej. Aberometria może być także pomocna w doborze soczewek o stabilnym kształcie i ocenie ich dopasowania.

Rozwój chirurgii refrakcyjnej sprzyja pogłębianiu wiedzy nt. aberracji. Postęp w tej dziedzinie ukierunkował uwagę na to, że u pacjentów po prawidłowo wykonanych zabiegach nie uzyskano oczekiwanego idealnego efektu, czyli pełnej ostrości wzroku i pełnego komfortu wzrokowego. Poszukiwano przyczyny tego stanu rzeczy i dowiedziono, że tkwi ona w aberracjach wysokiego rzędu, które narastają po zabiegach refrakcyjnych. Obecnie do zabiegów planowanych indywidualnie używane są analizatory czoła fali sprzężone z laserem excimerowym. Stosowanie ich do zabiegów chirurgii refrakcyjnej ma na celu zminimalizowanie efektu pojawienia się wysokich miar aberracji wysokiego rzędu po zabiegach refrakcyjnych, które redukują aberracje niskiego rzędu. Badania aberometryczne pozwalają ponadto precyzyjnie zakwalifikować pacjenta do wszczepu soczewki wewnątrzgałkowej wieloogniskowej, torycznej czy asferycznej.

Korygowanie najdrobniejszych aberracji układu optycznego oka daje poprawę jakości widzenia i jest ważnym celem optyki okulistycznej. Znacząca rola aberometrii jest w tej kwestii bezsporna. Od 2000 r. do zabiegów planowanych indywidualnie używane są analizatory czoła fali sprzężone z laserem excimerowym. Ponadto wewnątrzgałkowe soczewki modyfikujące aberracje wysokiego rzędu, stosowane w zabiegach usunięcia zaćmy, są coraz bardziej dostępne (16). Przyszłością fizyki adaptatywnej jest najprawdopodobniej konstruowanie soczewek okularowych i kontaktowych projektowanych indywidualnie, tak aby można było uwzględnić potrzeby konkretnych pacjentów.

Piśmiennictwo:

1. Nowak J, Zajac M: *Optyka kurs elementarny*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, 73-106.
2. Szaflik J, Ambroziak AM (red.): *Basic and Clinical Science Course. 3 Optyka Kliniczna*. Elsevier Urban & Partner, Wrocław 2008-2009, 251-263, 345-349.

3. Zajac M: *Aberracje oka – ich pomiar i korekcja*. Kontaktol i Optyka Okulist 2007, 1(15), 18-28.
4. Sborgia C, Alessio G, La Tegola MG: *Aberometria corneale*. (w) Ferreri G, Roszkowska AM: *Semeiotica della cornea*. Medical Books, Palermo 2007, 115-125.
5. Ginis HS, Plainis S, Pallirakis A: *Variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using clinical Shack-Hartmann aberrometer*. BMC Ophthalmology 2004, 4, 1.
6. Lee JM, Lee DJ, Jung WJ, Park WC: *Comparison between anterior corneal aberration and ocular aberration in laser refractive surgery*. Korean J Ophthalmol 2008, 22, 164-168.
7. Mrukwa-Kominek E, Gierek-Ciaciura S, Wyględowska-Promieńska D, Zawajska I: *Ocena zdolności akomodacyjnych układu wzrokowego w zależności od wieku z zastosowaniem systemu WASCA*. Klin Oczna 2003, 105(5), 277-281.
8. Asejczyk-Widlicka M, Pierscionek BK: *Fluctuations in intraocular pressure and the potential effect on aberrations of the eye*. Br J Ophthalmol 2007, 91, 1054-1058.
9. Applegate RA, Thibos LN, Twa MD, Sarver EJ: *Importance of fixation, pupil center, and reference axis in ocular wavefront sensing, videokeratography, and retinal image quality*. J Cataract Refract Surg 2009, 35, 139-152.
10. Lopez-Gil N, Fernandez-Sanchez V, Legras R, Montes-Mico R, Lara F, Nguyen-Khoa JL: *Accommodation-related changes in monochromatic aberrations of the human eye as function of age*. Invest Ophthalmol Vis Sci 2008, 49, 1736-1743.
11. Montes-Mico R, Alio JL, Munoz G, Perez-Santonja JJ, Charman NW: *Postblink changes in total and corneal ocular aberrations*. Ophthalmology 2004, 111, 758-767.
12. Montes-Mico R, Caliz A, Alio JL: *Changes in ocular aberrations after instillation of artificial tears in dry-eye patients*. J Cataract Refract Surg 2004, 30, 1649-1652.
13. Goto E, Yagi Y, Kaido M, Matsumoto Y, Konomi K, Tsubota K: *Improved functional visual acuity after punctal occlusion in dry eye patients*. Am J Ophthalmol 2003, 135, 704-705.
14. Amano S, Amano Y, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, Oshika T: *Age-related changes in corneal and ocular high-order wavefront aberrations*. Am J Ophthalmol 2004, 137, 988-992.
16. Żelichowska B, Rękas M, Krix-Jachym K, Rubajczyk M: *Aberracje wyższego rzędu w fizjologicznym układzie optycznym – doświadczenia własne*. Klin Oczna 2007, 109(4-6), 121-126.
16. Maeda N: *Clinical applications of wavefront aberrometry – a review*. Clinical and Experimental Ophthalmology 2009, 37, 118-129.
17. Zhu M, Collins MJ, Iskander DR: *Microfluctuations of wavefront aberrations of the eye*. Ophthalm Physiol Opt 2004, 24, 562-571.

Praca wpłynęła do Redakcji 14.02.2011 r. (1279)
Zakwalifikowano do druku 31.12.2011 r.

Adres do korespondencji (Reprint requests to):

lek. med. Lucyna Moćko
Oddział Okulistyczny
Okręgowy Szpital Kolejowy
ul. Panewnicka 65
40-760 Katowice
e-mail: lucynamocko@konto.pl