



ZASADY UŻYCIA KOLOROWEGO DOPPLERA W BADANIACH OKULISTYCZNYCH (CZ. II) NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH PATOLOGII

Principles of Color Doppler Imaging using in ophthalmology (part II) presented on the example of selected abnormalities



Arkadiusz Zegadło¹, Artur Maliborski¹, Joanna Wierzbowska²

1. Wojskowy Instytut Medyczny – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Radiologii Lekarskiej, Polska
2. Wojskowy Instytut Medyczny – Państwowy Instytut Badawczy, Klinika Okulistyki, Polska

Arkadiusz Zegadło –  0000-0001-5728-1630
Joanna Wierzbowska –  0000-0002-6993-7518

Streszczenie: Badanie Doppler jest nieinwazyjną, powtarzalną i wiarygodną metodą oceny jakościowej i ilościowej przepływów w naczyniach gałki ocznej. W artykule wskazano na korzyści stosowania badań dopplerowskich w codziennej praktyce lekarskiej i jej możliwości w diagnostyce różnicowej i monitorowaniu stanu chorego przez lekarzy różnej specjalności. Wskazano na najczęstsze patologie okulistyczne z wykorzystaniem przypadków z własnej praktyki i omówieniem uzyskanych obrazów. Szczegółowo opisano zagadnienia związane z bezpieczeństwem stosowania ultradźwięków w okulistyce ze zwróceniem szczególnej uwagi na obowiązujące normy oparte na indeksie mechanicznym i termicznym, określające graniczne narażenie gałki ocznej na oddziaływanie wiązki ultradźwiękowej emitowanej przez nadajnik USG. Opisano także ograniczenia tej metody, jakie należy uwzględnić w praktyce.

Abstract: Doppler imaging is a non-invasive, repeatable and reliable method of qualitative and quantitative assessment of blood flow in the ocular vessels. The article explains benefits of using Doppler imaging in everyday ophthalmic practice and its possibilities in the differential diagnosis and monitoring of the patient's condition by physicians of different specialties. Furthermore, the article lists most common ophthalmological pathologies using cases from author's own practice, with a discussion of the acquired images. The issues related to the safety of the use of ultrasound in ophthalmology are described in detail, paying special attention to the applicable standards based on the Mechanical Index and Thermal Index, defining the limit exposure of the eyeball to the effects of the ultrasound beam emitted by the ultrasound transducer. The limitations of this method, which should be taken into account when using this modality, are also described.

Słowa kluczowe: okulistyka, ultrasonografia, kolorowy Doppler.

Key words: ophthalmology, ultrasound, color Doppler.

DOI 10.53301/lw/151938

Praca wpłynęła do Redakcji: 30.06.2022

Zaakceptowano do druku: 07.07.2022

Autor do korespondencji:

Arkadiusz Zegadło

Wojskowy Instytut Medyczny – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Radiologii Lekarskiej

e-mail: arekzegadlo@gmail.com

Wstęp

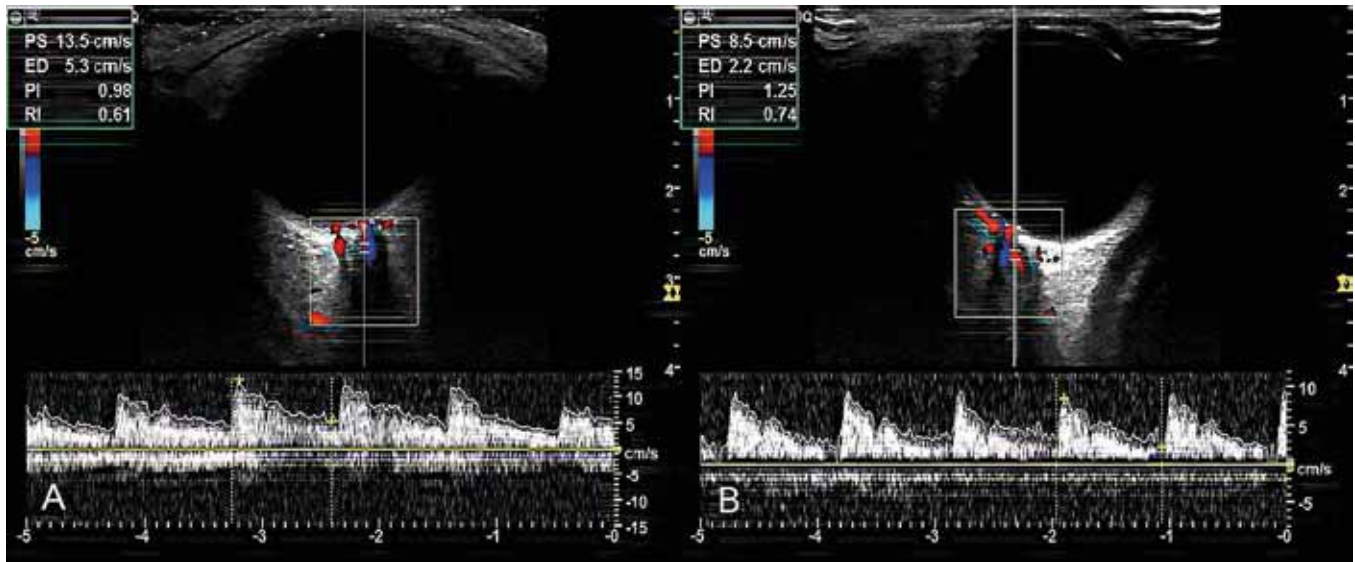
W pierwszej części artykułu zaznajomiono Czytelnika z podstawami teoretycznymi badania kolorowym Dopplerem CDI (*color doppler imaging*), nazewnictwem i wskazaniem do wykonywania badań dopplerowskich w okulistyce ze zwróceniem uwagi na technikę oraz charakterystykę przepływów poszczególnych naczyń pozagałkowych. W obecnym artykule Autorzy skupili się na omówieniu wybranych patologii, ograniczeń i zasad bezpieczeństwa.

Wybrane patologie

Oczny zespół niedokrwienny jest spowodowany ostrym lub przewlekłym zwężeniem tętnicy szyjnej wewnętrznej, rzadziej tętnicy ocznej lub tętnic bezpośrednio zaopa-

trujących tarczę nerwu wzrokowego. W CDI cechuje się spadkiem prędkości skurczowej PS (*peak systolic*) i końcoworozkurczowej ED (*end diastolic*) oraz wzrostem oporu przepływu RI (*resistive index*). Deficyt takiego przepływu przedstawiono na Rycinie 1.

Szczególną postacią ostrego niedokrwienia siatkówki objawiającego się nagłym, jednoocznym zaniemwidzeniem jest **zator tętnicy środkowej siatkówki**. Badanie CDI potwierdza brak sygnału ruchu krwi w CRA. U części chorych obserwuje się odwrócenie kierunku przepływu krwi w tętnicy ocznej i jej gałęziach, co jest wynikiem jej „podkradania” z obszaru unaczynienia tętnicy szyjnej zewnętrznej poprzez anastomozy, jakimi są tętnica nadbłoczkowa i nadoczodołowa (Ryc. 2).



Rycina 1. Pomiar CDI tętnic środkowych siatkówki CRA (*central retinal artery*) u tego samego pacjenta.

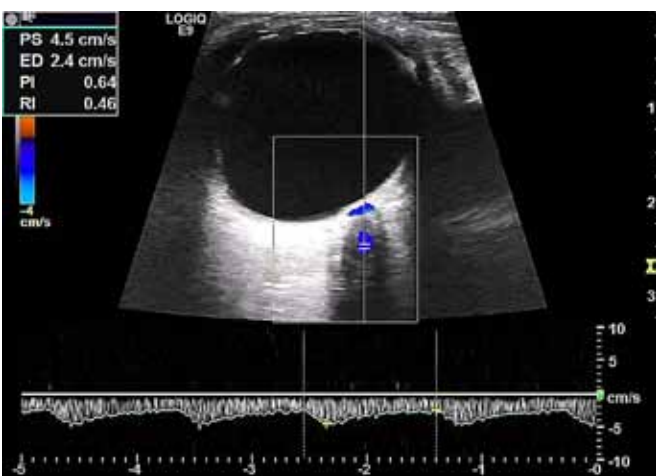
Na rycinie A przedstawiono prawidłowe parametry przepływu w CRA w lewej gałce ocznej i prawidłowe spektrum przepływu krwi w naczyniu.

Na prezentacji B przedstawiono zredukowany przepływ w CRA prawej gałki ocznej spowodowany przez istotne hemodynamiczne zwężenie tętnicy szyjnej wewnętrznej.

PS (*peak systolic*) – prędkość szczytowa, ED (*end diastolic*) – prędkość końcoworozkurczowa, MD (*mean diastolic*) – średnia prędkość rozkurczowa, PI (*pulsatility index*) – wskaźnik pulsacji, RI (*resistive index*) – wskaźnik oporu przepływu, TAMAX – prędkość uśredniona w czasie.

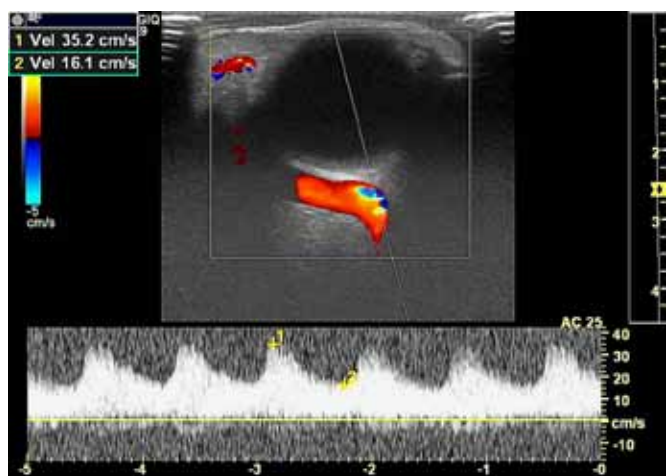
Ich właściwa ocena CDI jest czynnikiem prognostycznym w ocenie niewydolności krążenia wewnątrzmoźgowego i monitorowaniu chorych po leczeniu endowaskularnym zwężeń tętnic szyjnych [1, 2].

Przetoka jamista jest przykładem malformacji żylniej, w której badanie kolorowym Dopplerem potwierdza obserwacje kliniczne poprzez wykrycie poszerzenia naczynia żylnego, najczęściej żyły ocznej górnej, z nietypowym, niskooporowym spektrum przepływu, charakterystycznym dla naczynia tętniczego (Ryc. 3).

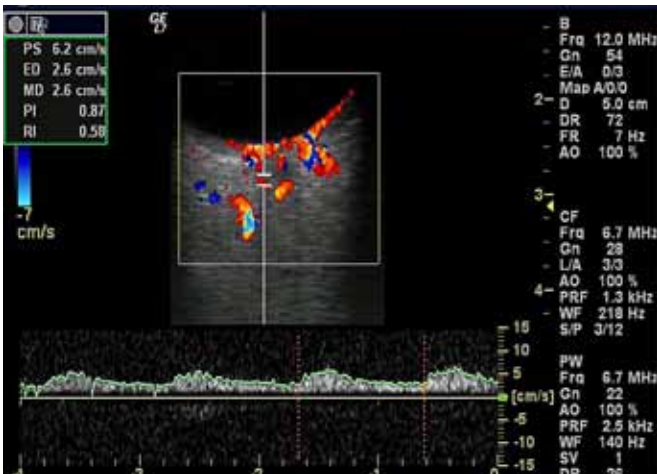


Rycina 2. Nieprawidłowy, odwrócony i zwolniony przepływ w tętnicy środkowej siatkówki CRA oznaczony kolorem niebieskim.

Innym przykładem zastosowania kolorowego Dopplera w okulistyce są badania nad **jaskrą**. Badania CDI mogą być pomocne zarówno w rozpoznaniu niedokrwienia tarczy nerwu wzrokowego, jak i w monitorowaniu skuteczności leczenia. U chorych na jaskrę dochodzi do stopniowej redukcji przepływu w tętnicach środkowej siatkówki i rzęskowych tylnych krótkich [3, 4, 5, 6, 7]. Na przykładzie pomiarów przepływów w jednej z tętnic rzęskowych tylnych krótkich wykazano zmiany hemodynamiczne towarzyszące jaskrze, które przedstawiono na Rycinie 4.



Rycina 3. Pomiar przepływu krwi w patologicznie poszerzonej żyły ocznej górnej SOV (*superior ophthalmic vein*). Spektrum typowe dla naczynia tętniczego. Podejrzenie przetoki jamistej zwiększającej ciśnienie krwi w układzie żylnym oczodołu. Ustalony przez badacza kąt insonacji (AC) wynosi 25 stopni. Vel = 35,2 cm/s – prędkość maksymalna przepływu w naczyniu, Vel = 16,1 cm/s – prędkość końcoworozkurczowa.



Rycina 4. Redukcja parametrów prędkościowych w tętnicy rzęskowej tylnej krótkiej SPCA (*short posterior ciliary artery*) metodą CDI u chorego na jaskrę pierwotnie otwartego kąta.

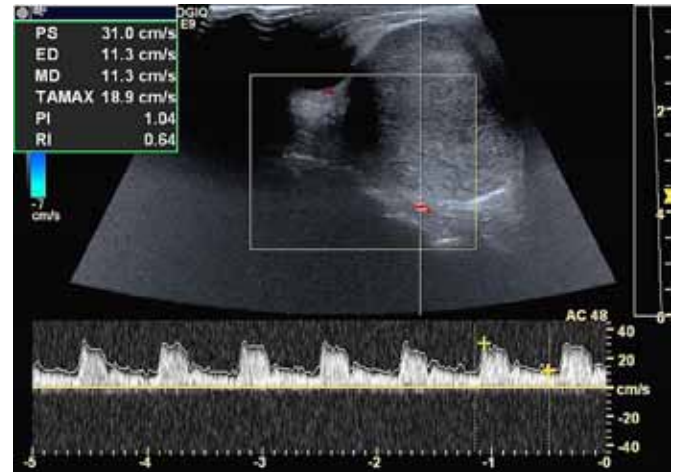
Podobne zmiany obserwowane są także w zmianach naczyń w przebiegu AMD oraz cukrzycy [8, 9, 10].

USG z użyciem kolorowego Dopplera jest doskonałym narzędziem do oceny zmian ogniskowych wewnątrzgałkowych, które pozwala na uwidocznienie ognisk guza mniejszych niż 3 mm. W przypadku **czerniaka** jak najwcześniejsze wykrycie guza zwiększa szanse chorego na wyleczenie [11]. Typowy obraz ogniska czerniaka o lokalizacji wewnątrzgałkowej to zmiana wypukła, gładkościenna, modelująca się ku wnętrzu gałki ocznej, najczęściej o jednorodnej strukturze. Zarówno stopień jej uwypuklenia, jak i bogate unaczynienie są czynnikami niekorzystnymi rokowniczo (Ryc. 5).

W różnicowaniu należy pamiętać o zmianach przerzutowych dogałkowych m.in. raka płuca, raka sutka czy narządu rodowego.

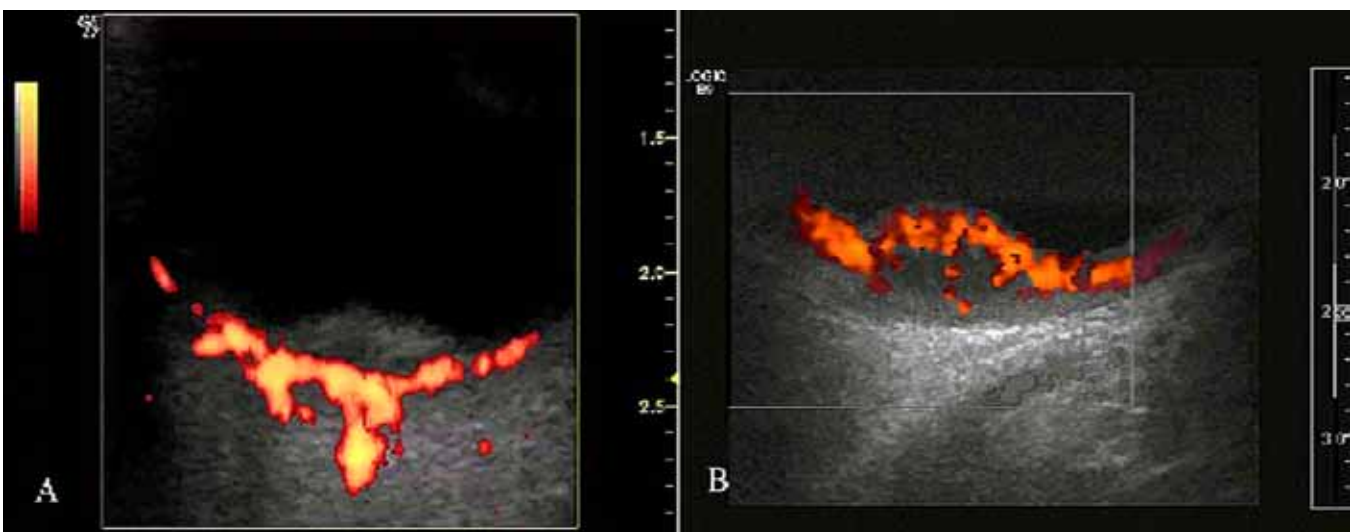
Naczyniak jamisty jest przykładem guza łagodnego, choć może powodować efekt masy w przestrzeni pozagałkowej, doprowadzając do ucisku na nerw wzrokowy,

naczynia lub mięśnie okoruchowe oraz do wytrzeszczu gałki ocznej. Zmiana w badaniu USG najczęściej jest jednorodna, ale może uwidaczniać sedymentujące poziomy krwi. Badanie CDI uwidacznia jej skąpy rysunek naczyń. Przykładem takiej patologii jest guz o lokalizacji wewnątrzgałkowej zaprezentowany na Rycinie 6.



Rycina 6. Rozległa, lita masa pozagałkowa z przyleganiem do tętnicy ocznej. Miejsce pomiaru prędkości przepływu krwi w tętnicy ocznej oznaczono kolorem czerwonym. Kąt insonacji (AC) 48 stopni. PS – prędkość maksymalnego przepływu, ED – prędkość końcoworozkurczowa, MD – prędkość średnia, PI – indeks pulsacji, RI – indeks oporu przepływu.

Chłoniak oczodołu jest rzadką lokalizacją pozawęzłową chłoniaków nieziarnicznych o częstości występowania 0,01-1% [12]. Chłoniaki oczodołowe pozagałkowe należy odróżnić od wewnątrzgałkowych, które należą do grupy chłoniaków ośrodkowego układu nerwowego, o odmiennym rokowaniu i sposobach leczenia [13]. Na Rycinie 7 przedstawiono nacieki chłoniaka typu MALT (ang. *mucosa associated lymphoid tissue*). Zmiana o położeniu pozastatkowym w przysrodkowej części oczodołu spowodowała boczne przemieszczenie gałki ocznej oraz ograniczenie jej ruchomości. Charakterystyczną cechą MALT jest niska echogeniczność nacieków, zbliżona do cieczy wodni-



Rycina 5. Badanie kolorowym Dopplerem (CDI). Prezentacja Power Doppler (PD) wykorzystywana do oceny jakościowej przepływów. Rycina A prezentuje przepływ krwi w naczyniówce i nieunaczynione ognisko na ścianie tylnej gałki ocznej o charakterze zmiany barwnikowego wypukłego.

Na Rycinie B uwidoczniono bogato unaczynioną zmianę ogniskową podminowującą naczyniówkę o charakterze czerniaka.

stej. Badanie dopplerowskie wykonane sondą convex 3,5 MHz pozwala na obrazowanie szerokiego sektora oczodołu. Uwidoczniono ono unaczynienie nacieku od strony jednej z tętnic sitowych.



Rycina 7. Chłoniak MALT (*mucosa associated lymphoid tissue*) w przestrzeni wewnątrzoczdolowej oznaczony białymi strzałkami. Guz leży w przyśrodkowej części oczodołu, powoduje boczne przemieszczenie gałki ocznej i uwypukla się w kierunku kąta przyśrodkowego oczodołu. Penetracja naczyń w obszar nacieku MALT w części przyśrodkowej oczodołu od strony tętnicy sitowej (sygnał CDI oznaczony kolorem pomarańczowym).

Bezpieczeństwo badań

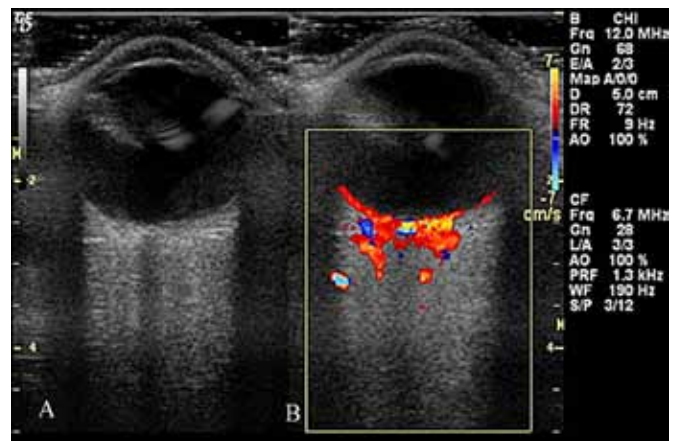
W 1976 r. *US Food and Drug Administration* (FDA) podjęła pracę nad zastosowaniami ultradźwięków w diagnostyce medycznej. Opracowano cztery graniczne wartości ekspozycji natężenia: dla badania obwodowych naczyń 720 mW/cm², w kardiologii 430 mW/cm², do badań w położnictwie i innych zastosowań 94 mW/cm² oraz dla badań w okulistyce 17 mW/cm² 1992 r., dążąc do optymalizacji wykorzystania CDI, FDA zmieniła ten limit na ogólny, wynoszący 720 mW/cm² dla wszystkich aplikacji z wyjątkiem badań okulistycznych. Obecnie obowiązują normy oparte o indeksy: mechaniczny MI (*mechanical index*) i termiczny TI (*thermal index*). Stwierdzono doświadczalnie, że oko jest szczególnie podatne na uszkodzenia termiczne i mechaniczne spowodowane nadmierną energią ultradźwiękową. Dlatego też organizacje: FDA i Światowa Federacja ds. Ultradźwięków w medycynie i biologii nałożyły ścisłe limity termiczne (TI) i mechaniczne (MI) dla tych aplikacji oparte na indeksach: TI < 1,0 oraz MI < 0. Dla porównania, do pozostałych badań – poza okulistycznymi i ginekologicznymi – normy opracowane na modelach zwierzęcych wynoszą odpowiednio MI < 1,9 i TI < 6. W praktyce zaleca się ograniczenie czasów badań do niezbędnie koniecznych i stosowanie się do zaleceń ALARA (*As Low As Reasonable Achievable*).

Ograniczenia

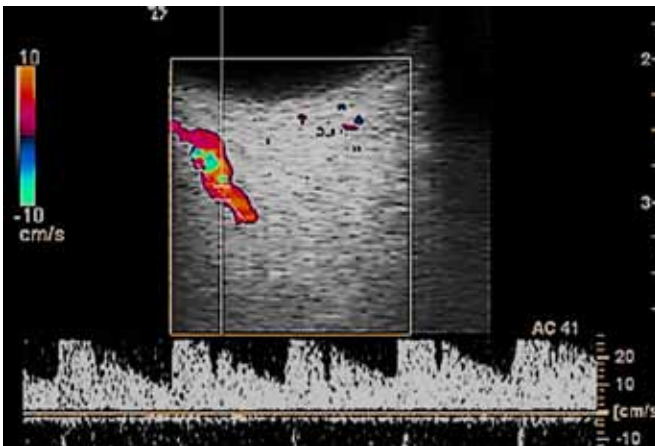
Dopplerowska ocena przepływów naczyń pozagałkowych powinna być oparta na poprawnej metodyce opartej na wiedzy uwzględniającej szereg ograniczeń. Najważniejsze z nich opracowano w Tabeli.

Tabela. Ograniczenia zastosowania badań dopplerowskich (CDI) w okulistyce.

Rodzaj ograniczenia	Skutek oddziaływania na pomiar
Istotne zwężenia tętnic szyjnych	Redukcja parametrów prędkościowych w tętnicach pozagałkowych po stronie zwężenia
Brak obrazu naczyń w USG 2D spowodowana ich zbyt małą średnicą (Rycina 8)	Trudność w ustawieniu poprawnego kąta insonacji [14]. Naczynia niedrożne nie są możliwe do identyfikacji (wyniki fałszywie ujemne)
Trudność w identyfikacji poszczególnych gałązek tętnic rzęskowych [15]	Tylko tętnice rzęskowe okołonurkowe – w przeciwieństwie do obwodowych – są odpowiedzialne za unaczynienie nerwu wzrokowego i mają bezpośredni wpływ na zmiany hemodynamiczne tarczy nerwu wzrokowego. Gałązki obwodowe doprowadzają krew do naczyniówki.
Aliasing (Rycina 9)	Artefakt obrazowania spektrum w wyniku błędnego oszacowania prędkości przepływu w naczyniu poprzez wyznaczenie zbyt niskich wartości na skali pomiarowej
Bramka pomiarowa CDI w obszarze blaszki sitowej	Blaszka sitowa jest miejscem fizjologicznego zwężenia tętnicy środkowej siatkówki i istotnego zwiększenia prędkości przepływu krwi, co powoduje fałszywe odczyty CDI. Pomiarów należy dokonywać 2-3 mm za tarczą nerwu wzrokowego
Zwapnienia, druzi na tylnej ścianie gałki ocznej [16, 17] (Rycina 10)	Imitują sygnał przesunięcia dopplerowskiego oraz ograniczają ocenę tętnicy środkowej siatkówki i tętnic rzęskowych „Artefakt mrugania” (<i>twinkling artifact</i>)



Rycina 8. Prezentacja B gałki ocznej i przestrzeni pozagałkowej bez wyodrębnienia naczyń (A) i wzbogacenie obrazu o badanie kolorowym Dopplerem CDI (B) wykazującym ruch krwi w niewidocznych w prezentacji B naczyniach.



Rycina 9. Aliasing na przykładzie badania przepływu krwi w tętnicy ocznej OA (*ophthalmic artery*). Widoczne jest „odcięcie” większych niż zdefiniowanych na skali pomiarowej prędkości przepływu krwi z ich dopisaniem poniżej linii bazowej.



Rycina 10. Zwapnienie (oznaczone białą strzałką) w ścianie gałki ocznej ogranicza możliwość oceny tarczy nerwu wzrokowego i przestrzeni pozagałkowej.

CDI ma ugruntowaną pozycję wśród technik diagnostycznych o udowodnionej przydatności klinicznej i wiarygodności wyników pod warunkiem stosowania się do metodyki badania [18, 19].

Podsumowanie

Zastosowanie kolorowej ultrasonografii dopplerowskiej pozwala na wiarygodną, jakościową i ilościową ocenę charakterystyki unaczynienia zmian ogniskowych zawartości oczodołu i hemodynamiki przepływów w naczyniach rejonu pozagałkowego.

Piśmiennictwo

1. Telman G, Kouperberg E, Sprecher E, et al. Assessment of ophthalmic artery collateral pathway in the hemispheric cerebral hemodynamics in patients with severe unilateral carotid stenosis. *Neurol Res*, 2003; 25: 309–11
2. Kawaguchi S, Sakaki T, Iwahashi H, et al. Effect of carotid artery stenting on ocular circulation and chronic ocular ischemic syndrome. *Cerebrovasc Dis*, 2006; 22: 402–8

3. Garhöfer G, Fuchsjäger-Mayrl G, Vass C et al. Retrobulbar blood flow velocities in open angle glaucoma and their association with mean arterial blood pressure. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010; 51: 6652–7
4. Martínez A, Sánchez M. Predictive value of colour Doppler imaging in a prospective study of visual field progression in primary open-angle glaucoma. *Acta Ophthalmol Scand*, 2005; 83: 716–22
5. Stalmans I, Harris A, Fieuws S, et al. Color Doppler imaging and ocular pulse amplitude in glaucomatous and healthy eyes. *Eur J Ophthalmol*, 2009; 19: 580–7
6. Zegadło A, Wierzbowska J. Colour Doppler imaging of retrobulbar circulation in different severity of glaucoma optic neuropathy. *Medical Ultrasonography*, 2021; 23: 410–417
7. Wierzbowska J, Wojtkiewicz S, Zbieć A et al. Prolonged postocclusive hyperemia response in patients with normal-tension glaucoma. *Med Sci Monit*, 2014; 20: 2607–16
8. Friedman E, Krupsky S, Lane AM, et al. Ocular blood flow velocity in age-related macular degeneration. *Ophthalmology*, 1995; 102: 640–6
9. MacKinnon JR, McKillop G, O'Brien C, et al. Colour Doppler imaging of the ocular circulation in diabetic retinopathy. *Acta Ophthalmol Scand*, 2000; 78: 386–9
10. Modrzejewska M, Pieńkowska-Machoy E, Grzesiak W, et al. Predictive value of color Doppler imaging in an evaluation of retrobulbar blood flow perturbation in young type-1 diabetic patients with regard to dyslipidemia. *Med Sci Monit*, 2008; 14: 47–52
11. Eye Cancer Stages, Juni 2019
<https://www.cancer.org/cancer/eye-cancer/detection-diagnosis-staging/staging.html>
12. White WL, Ferry JA, Harris NL, et al. Ocular adnexal lymphoma. A clinicopathologic study with identification of lymphomas of mucosa-associated lymphoid tissue type. *Ophthalmology*, 1995; 102: 1994–2006
13. Chan C-C, Wallace DJ. Intraocular Lymphoma: Update on Diagnosis and Management. *Cancer Control*, 2004; 11: 285–95
14. Guthoff RF, Berger RW, Winkler P, et al. Doppler ultrasonography of the ophthalmic and central retinal vessels. *Archives of Ophthalmology*, 1991; 109: 532–536
15. Ustymowicz A. Ultrasonografia dopplerowska z obrazowaniem przepływu krwi w kolorze (USG-kolor Doppler) w diagnostyce okulistycznej – doświadczenia własne i przegląd literatury. *Klin. Oczna*, 2008; 110: 108–111
16. Ustymowicz A, Krejza J, Mariak Z. Twinkling artifact in color Doppler imaging of the orbit. *J Ultrasound Med*, 2002; 21: 559–63
17. Ustymowicz A, Obuchowska I, Krejza J, et al. Limitations of color Doppler sonography in the imaging of ocular vessels. *Eur J Ophthalmol*, 2004; 14: 584–7
18. Matthiessen ET, Zeitz O, Richard G, et al. Reproducibility of blood flow velocity measurements using colour decoded Doppler imaging. *Eye (Lond)*, 2004; 18: 400–5
19. Vercellin Alice C V, Cutolo CA, Dellafiore C, et al. Inter-device reproducibility of retrobulbar blood flow velocity measurements in healthy subjects using color Doppler imaging. *J Ultrasound*, 2016; 19: 125–30