



ZASADY UŻYCIA KOLOROWEGO DOPPLERA W BADANIACH OKULISTYCZNYCH (CZ. I) – PODSTAWY TEORETYCZNE

Theoretical principles of Color Doppler Imaging in
ophthalmic ultrasound (part I)



Arkadiusz Zegadło¹, Artur Maliborski¹, Joanna Wierzbowska²

1. Zakład Radiologii Lekarskiej CSK MON WIM, Polska
2. Klinika Okulistyki CSK MON WIM, Polska

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

Streszczenie: Badanie Doppler w ocenie naczyń tętniczych pozagałkowych jest cennym uzupełnieniem diagnostyki obrazowej chorób oczodołu i gałki ocznej. W artykule opisano rys historyczny zastosowania ultrasonografii w medycynie, zastosowanie w chorobach okulistycznych, rozwój diagnostyki dopplerowskiej i podstawy teoretyczne uzyskiwanych pomiarów hemodynamicznych z uwzględnieniem szczegółowej charakterystyki badania dopplerowskiego w ocenie tętnicy ocznej, tętnicy środkowej siatkówki i tętnic rzęskowych tylnych krótkich. Obrazy ultrasonograficzne gałki ocznej, wzbogacone o ocenę przepływów w naczyniach tętniczych pozagałkowych, cechują się potwierdzoną wiarygodnością i powtarzalnością pod warunkiem stosowania się do podstawowych zaleceń, które opisano w artykule. Metodyka pomiarów i zaproponowane normy odczytów wartości hemodynamicznych są pomocne w praktycznym zastosowaniu tej modalności w diagnostyce okulistycznej.

Abstract: Doppler examination in the assessment of retrobulbar arteries is a valuable supplement tool in the imaging diagnostics of orbital and eyeball diseases. The article describes the history of the use of ultrasound in medicine, its use in ophthalmic diseases, the development of Doppler diagnostics and the theoretical basis of the obtained hemodynamic measurements, including the detailed characteristics of the Doppler examination in the assessment of the ophthalmic artery, the middle retinal artery and short posterior ciliary arteries. Ultrasound images of the eyeball, together with the assessment of blood flow in the retrobulbar arteries, have proven to be reliable and repeatable, provided that the basic recommendations described in the article are followed. The methodology of measurements and the proposed norms of hemodynamic readings are helpful in the practical application of this modality in ophthalmic diagnostics.

Słowa kluczowe: kolorowy Doppler, okulistyka, naczynia rejonu pozagałkowego.

Key words: Color Doppler, ophthalmology, retrobulbar vessels.

DOI 10.53301/lw/151040

Praca wpłynęła do Redakcji: 05.06.2022

Zaakceptowano do druku: 15.06.2022

Autor do korespondencji:

Arkadiusz Zegadło
Zakład Radiologii Lekarskiej CSK MON WIM, Warszawa
e-mail: arekzegadlo@gmail.com

Wstęp

Ultrasonografia jest jedną z najbardziej popularnych i uznanych metod diagnostycznych. Zaletami są: nieinwazyjność, dostępność, niski koszt a jednocześnie wiarygodność i powtarzalność wyników. Postęp technologiczny polegający na używaniu elastografii, obrazowania 3D i 4D oraz zastosowanie wysokich częstotliwości, daje pewność ciągłego rozwoju tej dyscypliny nauki i stwarza warunki do doskonalenia warsztatu diagnostycznego.

Historia ultrasonografii

Odkrycie przez francuskich naukowców i braci Pierre'a i Jacques'a Curie efektu piezoelektrycznego w 1880 r., może być uznane za początek rozwoju ultrasonografii [1]. Efekt ten opierał się na zjawisku odkształcania się krysz-

tałów baru pod wpływem działania na nie pola elektrycznego i odwrotnie. W ten sposób kryształy mogą zarówno nadawać, jak i odbierać fale dźwiękową, co stało się podstawą konstrukcji przetworników ultradźwiękowych. Zjawisko zmiany częstotliwości fali względem poruszającego się źródła i odbiornika zostało odkryte przez austriackiego fizyka i astronoma Christiana Andreeasa Dopplera w 1842 r. i nazwane od jego imienia „zjawiskiem Dopplera” lub „przesunięciem dopplerowskim” [2]. Warto zaznaczyć, że zachodzi ono dla każdego rodzaju fali – elektromagnetycznej i akustycznej – co jest wykorzystywane w wielu urządzeniach służących pomiarom prędkości czy odległości, jak radary, sonary, mierniki laserowe.

Pierwszy skaner umożliwiający badanie w skali szarości w tzw. prezentacji B (*brightness-mode*) został stworzony w 1951 r. przez Johna Wilda i Johna Reida [3]. W latach

50. XX w. ultradźwięki zastosowano także po raz pierwszy w okulistyce do pomiarów odległości między kolejnymi warstwami gałki ocznej, co dało początek rozwojowi obrazowania w prezentacji A (*amplitude mode*) [4]. Pierwsze badania dopplerowskie zaczęto wykonywać w latach 60. ubiegłego wieku. Na początku miały zastosowanie w diagnostyce przepływów w dużych naczyniach, przede wszystkim w kardiologii, chirurgii naczyniowej i w położnictwie [5, 6, 7]. Dalszy postęp inżynierski umożliwił badanie przepływów w naczyniach o mniejszych rozmiarach, w tym w naczyniach oczodołowych [8, 9, 10]. Obecnie badanie kolorowym Dopplerem CDI (*color doppler imaging*) umożliwia ocenę jakościową i ilościową przepływów także w drobnych naczyniach pozagałkowych takich jak tętnica czy żyła środkowa siatkówki oraz tętnice rzęskowe tylne krótkie.

Wskazania do badań dopplerowskich w okulistyce

Badanie CDI jest cennym uzupełnieniem każdego badania w prezentacji B. Jest wykonywane w przypadku: urazów (podejrzenie odwarstwienia błony wewnętrznej gałki ocznej, odłączenia błony środkowej, krwawiaków wewnątrzgałkowych), diagnostyce guzów wewnątrzgałkowych i pozagałkowych, zmian w gruczole łzowym i tkankach powiek, a przede wszystkim w diagnostyce zaburzeń hemodynamicznych towarzyszących patologiom nerwu wzrokowego, chorobom układowym, cukrzycy, innym chorobom cywilizacyjnym jak jaskra czy angiopatia nadciśnieniowa. Najczęstsze wskazania do wykonania badania dopplerowskiego gałek ocznych przedstawiono w Tabeli 1.

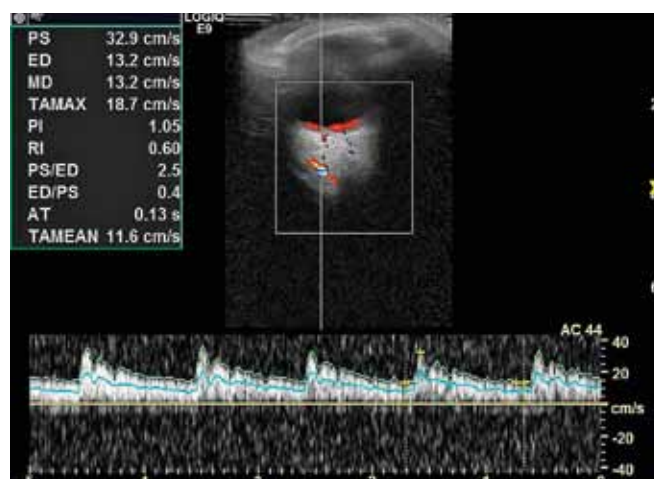
Tabela 1. Główne wskazania do stosowania badania dopplerowskiego w okulistyce.

Patologie naczyniowe	<ul style="list-style-type: none"> • zator tętnicy środkowej siatkówki • zakrzepica żyły środkowej siatkówki • ostra i przewlekła niewydolność tętnicy szyjnej (zwężenia) • przetoki tętniczo-żyłne (przetoka jamista) • cukrzyca, nadciśnienie tętnicze • niedokrwienie nerwu wzrokowego (jaskra) • choroby układowe (RZS, inne kolagenozy)
Guzy	<ul style="list-style-type: none"> • melanoma, inne guzy i przerzuty do gałki ocznej • patologie gruczolu łzowego (chłoniaki) • zmiany ogniskowe przestrzeni oczodołowej • patologie dróg łzowych
Orbitopatie zapalne	<ul style="list-style-type: none"> • ziarniniak Wegenera • choroba Gravesa-Basedowa
Urazy	<ul style="list-style-type: none"> • złamania ścian kostnych oczodołu • krwawiaki śródściennie gałki ocznej • urazy nerwu wzrokowego • odwarstwienia błon ściany gałki ocznej
Choroby OUN	<ul style="list-style-type: none"> • udary mózgu • zwiększona ciśnień wewnątrzczaszkowa (guzy, urazy, krwawiaki wewnątrzczaszkowe) • ocena wydolności koła naczyniowego Willisa przed i po zabiegach endowaskularnych

Parametry przepływu krwi mierzone metodą dopplerowską

Zachowanie prawidłowej metodyki badania owocuje uzyskaniem poprawnego zapisu spektrum przepływu krwi w naczyniu, które odzwierciedla ruch krwinek w jego świetle. Aparat USG umożliwia uzyskanie bardzo wielu informacji o hemodynamice przepływu krwi, co przedstawiono na Rycinie 1.

Rycina 1. Spektrum przepływu na przykładzie badania tętnicy ocznej.



Prezentacja wyników parametrów hemodynamicznych: PS (ang. peak systolic) – prędkość szczytowa, ED (ang. end diastolic) – prędkość końcoworozkurczowa, MD – (ang. mean diastolic) – średnia prędkość rozkurczowa, TAMAX (ang. time-averaged maximum velocity) – prędkość maksymalna uśredniona w czasie, PI (ang. pulsatility index) – wskaźnik pulsacji, RI (ang. resistive index) – wskaźnik oporu przepływu, AT (ang. acceleration time) – czas akceleracji, TAMEAN (ang. time-averaged mean velocity) – prędkość średnia uśredniona w czasie. Użyty kąt insonacji (AC) 44 stopnie.

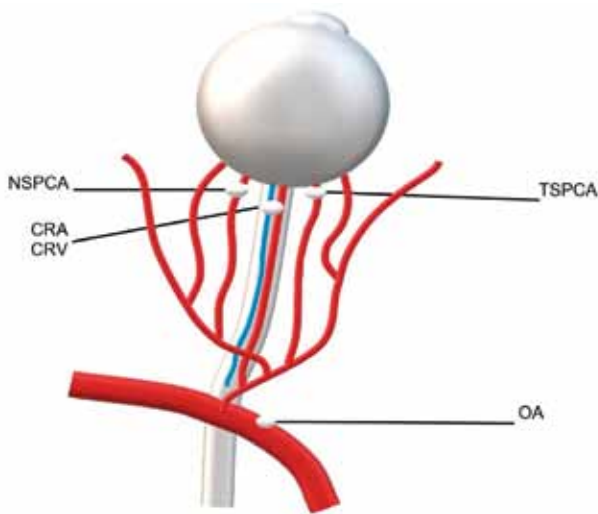
W badaniach okulistycznych w ocenie tętnic wykorzystuje się następujące parametry hemodynamiczne: prędkość szczytową przepływu PS (*peak systolic*), prędkość końcoworozkurczową ED (*end diastolic*), średnią prędkość rozkurczową MD (*mean diastolic*), prędkość maksymalną uśrednioną w czasie TAMAX (*time-averaged maximum velocity*) oraz indeks oporu RI Puercelota (*resistive index*) i pulsacji PI Goslinga (*pulsatility index*). Dwa ostatnie są wyliczane na podstawie parametrów prędkościowych wg wzorów:

$$RI = (PS - ED) / PS$$

$$PI = (PS - ED) / TAMAX$$

Najczęściej ocenia się przepływy w tętnicy ocznej OA (*ophthalmic artery*), tętnicy środkowej siatkówki CRA (*central retinal artery*), tętnicach rzęskowych tylnych krótkich SPCA (*short posterior ciliary artery*) po stronie nosowej i skroniowej nerwu wzrokowego oraz żyłę środkowej siatkówki CRV (*central retinal vein*). Miejsca pomiarów tych naczyń przedstawiono na Rycinie 2.

Rycina 2. Schemat pokazujący miejsca pomiarów naczyń pozagałkowych przy użyciu kolorowego Dopplera.



OA (*ophthalmic artery*) – tętnica oczna,
CRA (*central retinal artery*) – tętnica środkowa siatkówki,
CRV (*central retinal vein*) – żyła środkowa siatkówki,
nSPCA (*nasal short posterior ciliary artery*) – tętnica rzęskowa tylna krótka nosowa,
tSPCA (*temporal short posterior ciliary artery*) – tętnica rzęskowa tylna krótka skroniowa.

W przypadku patologicznego unaczynienia guzów badanie ma na celu znalezienie wiodących naczyń i wykonanie oceny spektrum przepływu naczyń guza.

Efekt Dopplera i jego zastosowanie w USG

Obrazowanie metodą kolorowego Dopplera (CDI) to technika łącząca ultrasonografię w prezentacji B z obrazowaniem opartym na przesunięciu dopplerowskim (ΔF), który określa wzór:

$$(\Delta F) = F_e - F_o = 2 \times F_o \times V/C \times \cos \alpha$$

gdzie: F_e – częstotliwość fali emitowanej przez przetwornik, F_o – częstotliwość fali odbitej, V – prędkość przepływu krwi, C – prędkość rozchodzenia się fali w tkankach (ok. 1540 m/s), α – kąt insonacji. Kąt insonacji to kąt zawarty pomiędzy wiązką emitowanej przez przetwornik fali ultradźwiękowej, którego poprawne ustawienie wpływa na wiarygodność pomiarów. W praktyce jego wartość nie powinna być większa niż 60° [11]

Technika badania

Do badań okulistycznych używa się sond liniowych pracujących w zakresie częstotliwości 6-18 MHz, co jest kompromisem pomiędzy rozdzielczością a głębokością penetracji wiązki.

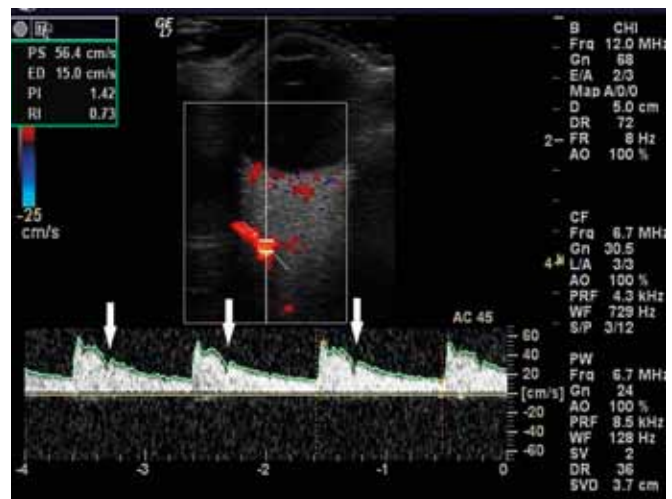
Należy pamiętać, że ucisk gałki ocznej przez czoło głowy jest czynnikiem zwiększającym ciśnienie wewnątrzgałkowe i powoduje zafałszowanie otrzymanych wyników (przepływ staje się pozornie zmniejszony). Dlatego też zaleca się wypełnienie oczodołu większą ilością żelu do badań USG, stanowiącego rodzaj „nakładki dystan-

sującej”, zabezpieczającej przed kompresją oka. W celu uzyskania wiarygodności i powtarzalności pomiarów za pomocą CDI nieodzowna jest znajomość anatomii przestrzeni pozagałkowej [9].

Tętnica oczna (OA)

Tętnica oczna jest gałęzią tętnicy szyjnej wewnętrznej, która odchodzi od niej w miejscu kolankowatego zagięcia w części jamistej naczynia. Choć jest największym z badanych naczyń w oczodole, nie jest widoczna w prezentacji B. Znakowanie kolorem ruchu krwinek w badaniu dopplerowskim pozwala na jej identyfikację. Najczęściej OA jest znajdująca na głębokości ok. 10-15 mm za gałką oczną, w miejscu skrzyżowania z nerwem wzrokowym, gdzie kieruje się z bocznej na przysiodkową stronę oczodołu. Spektrum przepływu w OA ma charakter pośredniooporowy z typowym wcięciem dichrotycznym na ramieniu zstępującym, wywołanym ruchem zamknięcia zastawki aortalnej serca [12]. Prawidłowy zapis spektrum zaprezentowano na Rycinie 3.

Rycina 3. Prawidłowe spektrum przepływu w tętnicy ocznej.



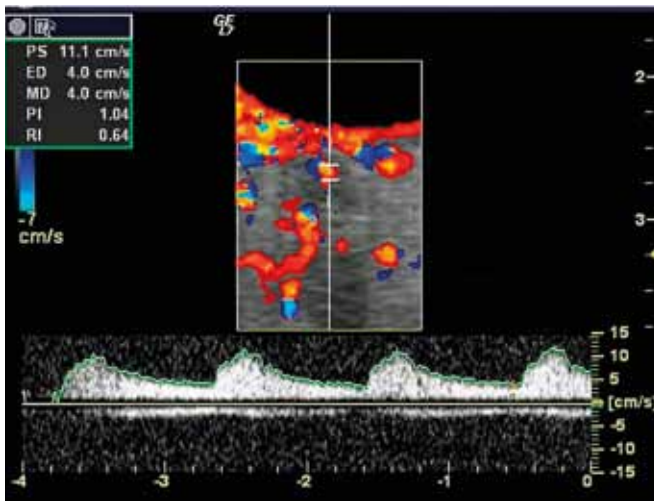
Wcięcie dichrotyczne na ramieniu zstępującym spektrum oznaczone strzałką. Ustalony przez badacza kąt insonacji (AC) zgodnie z przebiegiem naczynia wynosi 45°.

Tętnica i żyła środkowa siatkówki

Tętnica środkowa siatkówki (CRA) ma średnicę ok. 0,2 mm i jest jedyną gałęzią tętnicy ocznej o stałym położeniu. Jej końcowy fragment wraz z jednoimienną żyłą (CRV) mają przebieg w nerwie wzrokowym. Kolorowa mapa sygnału koduje kolorem czerwonym przepływ w CRA w kierunku do czoła głowy. Kolorem niebieskim znakowany jest przepływ o kierunku przeciwnym, w tym przypadku w CRV. Bramkę próbkującą należy ustawiać > 2 mm za tarczą nerwu wzrokowego. Należy unikać pomiarów na wysokości blaszki sitowej, która jest miejscem fizjologicznego zwężenia światła CRA, co skutkuje istotnym (40-70%) zawyżeniem parametrów prędkościowych [13, 14]. Prawidłowy wybór miejsca pomiaru, odpowiedniego zakresu prędkości na skali pomiarowej i poprawnego kąta insonacji (w przedziale 0-20°) warunkuje rzetelną ocenę parametrów hemodynamiki w CRA i CRV. Nad linią bazową spektrum tętnicze ma charakterystyczny niskooporo-

wy profil i wyraźnie zaznaczoną prędkość szczytową. Pod linią bazową uwidacznia się często jednocześnie fazowe spektrum z żyły środkowej siatkówki. Prawidłowy zapis spektrum przepływu w obu naczyniach przedstawiono na Rycinie 4.

Rycina 4. Zapis badania Doppler tętnicy i żyły środkowej siatkówki.

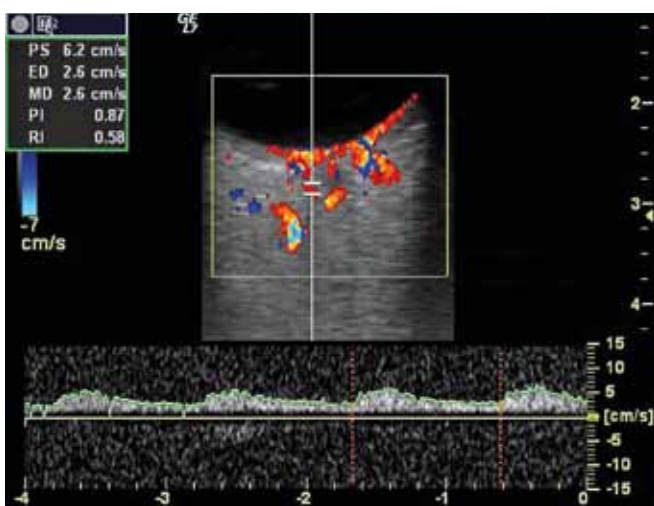


Spektrum CRA obrysowane zostało kolorem zielonym. Spektrum przepływu w CRV pod linią bazową. Brak korekcji kąta insonacji.

Tętnice rzęskowe tylne krótkie

Tętnice rzęskowe tylne krótkie są drobnymi gałęziami odchodzącymi od tętnicy ocznej. Gałęzie okołonerwowe, w postaci kilku naczyń po stronie nosowej i skroniowej od nerwu wzrokowego, są jedynymi naczyniami odpowiedzialnymi za ukrwienie przedniego odcinka nerwu wzrokowego. Gałęzie leżące obwodowo w sąsiedztwie tętnic rzęskowych długich, odpowiadają za ukrwienie naczyniówki. Badaniem USG powinno się poszukiwać gałęzi położonych jak najbliżej echa nerwu wzrokowego. Bramka kolorowego Dopplera obejmuje okolice tarczy nerwu wzrokowego. Widoczny jest sygnał przepływu (kolor czerwony) w sąsiedztwie pasma nerwu wzrokowego – pokazuje to Rycina 5.

Rycina 5. Przykład pomiaru tętnicy rzęskowej tylnej krótkiej o położeniu okołonerwowym po stronie nosowej tarczy nerwu wzrokowego.



Normy przepływów dopplerowskich w tętnicach pozagałkowych

Należy zwrócić uwagę, że przepływy w tętnicach pozagałkowych uwarunkowane są przez wiele nakładających się czynników. Liczne metaanalizy dowodzą, że dość trudno jest precyzyjnie wyznaczyć normę dla ogółu populacji, choć otrzymane wyniki analiz w przypadku grup kontrolnych stworzonych na potrzeby różnych badań, nie różnią się znacząco od siebie [15].

Wydaje się, że dobór grup wiekowych w sposób istotny determinuje otrzymane wyniki oceny dopplerowskiej, co potwierdziły badania jeszcze z końca lat 90. ubiegłego wieku [16]. Wielu autorów m.in. Galassi i Meyer dowodzili występowania u osób starszych zmian hemodynamicznych powodujących pogorszenie perfuzji oka pod postacią obniżenia prędkości maksymalnej i końcoworozkurczowej w OA, obniżenia prędkości końcoworozkurczowej oraz wzrostu współczynnika oporu w CRA oraz SPCA [17, 18]. Zmiany parametrów przepływu w tętnicach zapotrąających okolice tarczy nerwu wzrokowego mogą być związane także z zależnym od wieku zmniejszaniem objętości minutowej rzutu serca, objętości przepływającej krwi, a także wzrostu oporu obwodowego [16]. Proponowane przez autora zakresy norm hemodynamicznych dla poszczególnych naczyń pozagałkowych przedstawiono w Tabeli 2 [19].

Tabela 2. Normy przepływu krwi w naczyniach pozagałkowych badanych metodą kolorowego Dopplera [19].

NACZYNIĘ	PARAMETRY DOPPLEROWSKIE		
	PS (cm/s)	ED (cm/s)	RI
OA	39,7±7,3	10,9±3,2	0,72±0,05
CRA	11,5±2,0	4,0±1,0	0,66±0,06
nSPCA	12,1±3,3	5,4±2,5	0,60±0,06
tSPCA	12,3±4,2	4,9±2,0	0,60±0,06
CRV	5,9±1,2	4,1±0,9	29,9±5,4

Podsumowanie

Zastosowanie kolorowej ultrasonografii dopplerowskiej jest cennym uzupełnieniem badania USG, która pozwala na jakościową i ilościową, nieinwazyjną ocenę przepływu krwi w zmianach ogniskowych o lokalizacji wewnątrzgałkowej i pozagałkowej oraz w naczyniach tętnicznych i żylnych oczodołu. Zaletami są: dostępność, niski koszt procedury, brak przygotowania chorego, powtarzalność oraz wiarygodność otrzymywanych wyników przy zachowaniu bezpieczeństwa, pod warunkiem stosowania poprawnej metodyki badania. W artykule omówiono rys historyczny, najważniejsze wskazania zastosowania kolorowego Dopplera w okulistyce, szczególne warunki badania naczyń oraz obowiązujące normy pomiarów.

Piśmiennictwo

1. Baker J. P, The history of sonographers, *Journal of ultrasound in medicine*, 2005; 24: 1-14
2. Doppler C, Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels, Calve, 1842
3. Hagen-Ansert S. L, Society of Diagnostic Medical Sonographers: A Timeline of Historical Events in Sonography and the Development of the SDMS: In the Beginning..., *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 2006; 22: 272-278
4. Mundt G. H, Hughes W. F, Ultrasonics in ocular diagnosis, *Am J Ophthalmol*, 1956; 41: 488-98
5. Kasai C, Namekawa K, Koyano A, Omoto R, Real-Time Two-Dimensional Blood Flow Imaging Using an Autocorrelation Technique, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1985; 32: 458-64
6. Martin P. J, Evans D. H, Naylor A. R, Bell PRF. Transcranial colour coded sonography as an aid to measurement of blood flow velocity in the basal cerebral arteries, *Ultrasound in Medicine and Biology*, 1993; 19: 711-6
7. Emerson D. S, Cartier M. S, Altieri L. A, Felker R. E, Smith W. C, Stovall T G, u.a. Diagnostic efficacy of endovaginal color Doppler flow imaging in an ectopic pregnancy screening program, *Radiology*, 1992; 183: 413-20
8. Erickson S. J, Hendrix L. E, Massaro B. M, Harris G. J, Lewandowski M. F, Foley W. D, u.a. Color Doppler flow imaging of the normal and abnormal orbit, *Radiology*, 1989; 173: 511-6
9. Lieb W. E, Cohen S. M, Merton D. A, Shields J. A, Mitchell D. G, Goldberg B. B, Color Doppler imaging of the eye and orbit. Technique and normal vascular anatomy, *Arch Ophthalmol*, 1991; 109: 527-31
10. Baxter G. M, Williamson T. H, Color Doppler flow imaging in central retinal vein occlusion: a new diagnostic technique?, *Radiology*, 1993; 187: 847-50
11. Hradílek P, Stourac P, Bar M, Zapletalová O, Skoloudík D, Colour Doppler imaging evaluation of blood flow parameters in the ophthalmic artery in acute and chronic phases of optic neuritis in multiple sclerosis, *Acta Ophthalmol*, 2009; 87: 65-70
12. Williamson T. H, Harris A, Color Doppler ultrasound imaging of the eye and orbit, *Surv Ophthalmol*, 1996; 40: 255-67
13. Ustymowicz A, Krejza J, Tarasów E, Mariak Z, Proniewska-Skrettek E, Zmienność parametrów dopplerowskich przepływu krwi w środkowej tętnicy siatkówki w zależności od miejsca pomiaru, *Klinika Oczna*, 1: 441-444
14. Dennis K. J, Dixon R. D, Winsberg F, Ernest J. T, Goldstick T. K, Variability in measurement of central retinal artery velocity using color Doppler imaging, *J Ultrasound Med*, 1995; 14: 463-6
15. Meng N, Zhang P, Huang H, Ma J, Zhang Y, Li H, u.a. Color Doppler imaging analysis of retrobulbar blood flow velocities in primary open-angle glaucomatous eyes: a meta-analysis, *PLoS one*, 2013; 8: e62723
16. Williamson T. H, Lowe G. D, Baxter G. M, Influence of age, systemic blood pressure, smoking, and blood viscosity on orbital blood velocities, *Br J Ophthalmol*, 1995; 79: 17-22
17. Galassi F, Nuzzaci G, Sodi A, Casi P, Cappelli S, Vielmo A, Possible correlations of ocular blood flow parameters with intraocular pressure and visual-field alterations in glaucoma: a study by means of color Doppler imaging, *Ophthalmologica*, 1994; 208: 304-8
18. Meyer J. I, Khalil R. M, Obuchowski N. A, Baus L. K, Common carotid artery: variability of Doppler US velocity measurements, *Radiology*, 1997; 204: 339-41
19. Baxter G, Williamson T, Color Doppler imaging of the eye: Normal ranges, reproducibility, and observer variation, *Journal of ultrasound in medicine: official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, 1995; 14: 91-6