

Nowoczesna tonometria – więcej niż pomiar ciśnienia

Modern tonometry – more than pressure measurement

Małgorzata Mulak¹, Dorota Szumny^{2,3}

¹ Katedra i Klinika Okulistyki, Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu
Kierownik Kliniki: prof. dr hab. n. med. Marta Misiuk-Hojło

² Katedra i Zakład Farmakologii, Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu
Kierownik Katedry: prof. dr hab. n. med. Adam Szeląg

³ Klinika Okulistyki, Uniwersytecki Szpital Kliniczny we Wrocławiu
Kierownik Kliniki: prof. dr hab. n. med. Marta Misiuk-Hojło



STRESZCZENIE

Pomiar ciśnienia wewnątrzgałkowego tonometrem Goldmanna, opisany po raz pierwszy w 1957 r., do dziś jest standardem. Jednak jego ograniczenia stały się podstawą licznych poszukiwań zmierzających do opracowania nowego tonometru, którego wyniki pomiarowe byłyby jak najmniej uzależnione od grubości rogówki i innych jej cech.

Obecnie badane są urządzenia, które nie tylko mierzą ciśnienie wewnątrzgałkowe, ale także określają inne parametry, jakie mogą być użyteczne w codziennej praktyce okulistycznej. Jednym z nich jest bezkontaktowy tonometr aplanacyjny Reicherta, który wykonuje także analizę właściwości viskoelastycznych rogówki. Zasada jego działania opiera się na podwójnej aplanaacji pojedynczym strumieniem powietrza, co umożliwia ocenę współczynnika oporu rogówki oraz jej histerezy.

Słowa kluczowe: jaskra, tonometria, tonometr Goldmanna, tonometr z analizatorem biomechaniki rogówki

ABSTRACT

Goldmann tonometer intraocular pressure measurement was described in 1957, and is still the standard method in use. However, its limitations were the basis of numerous studies aimed to develop a new device whose dependence on factors such as the thickness and other characteristics of the cornea would be kept to a minimum.

Currently, different devices are tested that do not only measure the intraocular pressure but also define other parameters that may be useful in the daily practice of ophthalmology. These include non-contact applanation tonometer (ORA, Ocular Response Analyzer, Reichert), which performs the analysis of the viscoelastic properties of the cornea too. The principle of operation is based on a bi-directional applanation using a single stream of air, which enables assessment of the corneal resistance factor and corneal hysteresis.

Key words: glaucoma, tonometry, Goldmann tonometer, tonometer with Ocular Response Analyzer

NAJWAŻNIEJSZE

Opisano wyniki badań najnowszych tonometrów, w tym tonometru Reicherta z analizatorem biomechaniki rogówki, i porównano je ze standardowo stosowanym tonometrem Goldmanna.

HIGHLIGHTS

The paper describes results of the latest tonometers, including the Reichert Ocular Response Analyzer (ORA), comparing them to a standard Goldmann tonometer.

WSTĘP

Podwyższone ciśnienie wewnątrzgałkowe to najpoważniejszy czynnik ryzyka rozwoju jaskry. Statystycznie prawidłowe wynosi 10–21 mmHg, a wartości powyżej 21 mmHg uważa się za podejrzanę – pacjenci z nimi wymagają częstszej diagnostyki, nawet jeśli nie występują u nich objawy kliniczne.

Należy jednak pamiętać, że zakres prawidłowego ciśnienia odnosi się do pomiaru tonometrem Goldmanna, którego zasady działania zostały opisane w roku 1957. Choć jego użycie nadal stanowi złoty standard, to ma też szereg ograniczeń, ponieważ uzyskane wartości zależą od różnych parametrów. Zawyżenie ciśnienia może być spowodowane użyciem zbyt dużej ilości fluoresceiny, z kolei zastosowanie zbyt małej ilości zaniża pomiar o 2–3 mmHg. Błędy pomiaru wynikają też z astygmatyzmu, krzywizny rogówki i przede wszystkim jej grubości [1–4].

TONOMETR GOLDMANNA

Tonometr Goldmanna został skalibrowany dla grubości rogówki 520 μm . Obecnie jednak przyjmuje się, że jej uśredniona grubość wynosi 540 μm . Parametr ten wpływa na wyniki pomiaru, ponieważ grubsze rogówki zawyżają, a cieńsze zaniżają rzeczywiste wartości. Wykonywana powszechnie pachymetria pozwala na zniwelowanie błędów wynikających z różnej grubości rogówek, jednakże u osób po operacjach refrakcyjnych są one trudne do skorygowania i wyniki mimo wszystko mogą się okazać zafałszowane. Istotną rzeczą jest uzyskanie od takich pacjentów informacji o grubości centralnej części rogówki przed wykonaniem korekty wady wzroku [1, 2].

Należy również pamiętać, że grubość rogówki nie jest jedynym definiującym ją parametrem – istnieje wiele innych, określających ją właściwości biochemicznych, takich jak lepkość, sprężystość i elastyczność, składające się na jej tzw. histerezę [1].

Ograniczenia tonometru Goldmanna dały impuls do licznych badań zmierzających do opracowania nowego tonometru, którego wyniki pomiarowe byłyby w jak najmniejszym stopniu uzależnione od grubości i innych cech rogówki.

Nowoczesne tonometry oferują wiele dodatkowych możliwości, np.:

- biorezonansowy aplanacyjny tonometr ART (BioResonator Good Eye), występujący w wersjach montowanej do lampy szczelinowej i manualnej, umożliwia szybkie i komfortowe badanie
- dynamiczny konturowy tonometr PASCAL (Ziemer Ophthalmic Systems) oprócz ciśnienia wewnątrzgałkowego bada także amplitudę tętna ocznego

- tonometr przezpówkowy Diaton (BiCOM Inc.) pozwala oszacować ciśnienie wewnątrzgałkowe bez znieczulania i dotykania rogówki
- tonometr indukcyjny Icare (Icare Finland) – tonometr ręczny, ruchoma sonda, mierzy ciśnienie na powierzchni rogówki, nie wymaga znieczulenia.

Nowe aparaty są jednak dość słabo dostępne, problemem może też być określenie zakresu normy [4, 5].

NOWE TONOMETRY

Tonometr z analizatorem biomechaniki rogówki Reicherta (ORA, *Ocular Response Analyser*) jest przyrządem bezkontaktowym, obliczającym ciśnienie wewnątrzgałkowe w oparciu o podwójną aplanację strumieniem powietrza. Uśrednione wartości pomiarów odpowiadają ciśnieniu skorelowanemu z tonometrią Goldmanna (IOPg, *Goldmann correlated intraocular pressure*), natomiast różnica między wynikami w milimetrach słupa rtęci (mmHg) stanowi tzw. histerezę rogówkową (CH, *corneal hysteresis*). Na podstawie tych danych aparat wylicza ciśnienie rogówkowo skompensowane (IOPcc, *corneal compensated intraocular pressure*) i wskaźnik oporu rogówki (CRE, *corneal resistance factor*) [1].

Dlatego też na większą uwagę zasługują tonometry, które nie tylko mierzą ciśnienie wewnątrzgałkowe, ale także określają inne parametry użyteczne w codziennej praktyce okulistycznej. Do takich urządzeń należy bezkontaktowy Reichert *Ocular Response Analyser*, który analizuje również właściwości wiskoelastyczne rogówki. Według danych z piśmiennictwa histereza rogówkowa jest istotnym parametrem umożliwiającym oszacowanie progresji jaskry i wyodrębnienie grupy ryzyka [3, 6–8].

BADANIA PORÓWNAWCZE

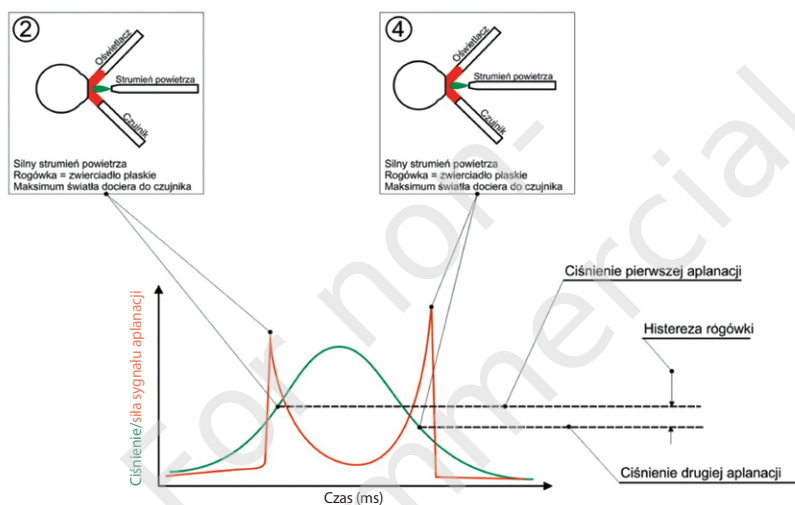
Nowe metody tonometryczne, takie jak dynamiczny konturowy tonometr PASCAL (DCT, *dynamic contour tonometer*) czy ORA, są w mniejszym stopniu zależne od właściwości rogówki i jej grubości. Wiele prac naukowych poświęcono określeniu zgodności wyników nowych tonometrów ze złotym standardem, czyli tonometrią Goldmanna [9, 10]. W prospektywnych studiach porównujących 4 tonometry: ICare, tonometr dynamiczny konturowy PASCAL, analizator wzrokowy ORA i tonometr Goldmanna, przebadano 93 pacjentów (93 oczu), podzielonych na 4 grupy. U wszystkich wykonano ultrasonograficzne badanie centralnej grubości rogówki (CCT, *central corneal thickness*). Nie wykazano korelacji między grubością rogówki a wartościami ciśnienia wewnątrzgałkowego zmierzonymi badanymi tonometrami. Wyniki uzyskane przy pomocy ICare były spoj-

ne z odczytami tonometru Goldmanna, natomiast odczyty tonometru aplanacyjnego Goldmanna (GAT, *Goldmann applanation tonometry*) korelowały z pomiarami IOPg (skorelowanymi goldmannowsko) uzyskanymi na aparacie ORA. Nie stwierdzono preferowania przez pacjentów któregoś z tonometrów [10].

statystyczna otrzymanych danych wykazała ścisłą korelację między wynikami ciśnienia wewnątrzgałkowego otrzymanymi czterema metodami (IOP Goldmann, IOPair, IOPg, IOPcc) we wszystkich trzech grupach pacjentów. Średnia wartość histerezy rogówkowej była wyższa w grupie kontrolnej (10,3 mmHg) niż u chorych z jaskrą (9,8 mmHg)

RYCINA 1

Zasada działania tonometrów technologii Corneal Response (źródło: katalog OPTOtech Medical, opublikowano za zgodą właściciela praw).



W badaniu opublikowanym w 2008 r. porównano wysokość ciśnienia wewnątrzgałkowego (CWG) zmierzono: ORA, GAT i DCT, i odniesiono do CCT oraz CH. Przeanalizowano otrzymane dane z 94 oczu i stwierdzono, że wartości CWG otrzymane przy pomocy tych 3 aparatów nie korelują z CCT, wykryto natomiast zależność CH od IOPcc, badanego analizatorem ORA, podczas gdy w przypadku wyników GAT i DCT ta korelacja była niewielka. Wysokość CWG zmierzona tonometrem ORA była znacząco wyższa niż uzyskana przy użyciu DCT oraz GAT. Autorzy zwracają uwagę, że należy o tym pamiętać, porównując wartości CH i wartości CWG [6].

Streho i wsp. przeprowadzili prospektywne badania, w których uczestniczyły 3 grupy pacjentów:

- z jaskrą (67 oczu)
- z nadciśnieniem ocznym (55 oczu)
- kontrolna (207 oczu).

Badania ciśnienia wewnątrzgałkowego wykonywano ORA, tonometrem Goldmanna i tonometrem bezkontaktowym (IOPair). Przy pomocy ORA mierzono ponadto CH i IOPcc, a tonometrem Goldmanna – ciśnienie skorelowane (IOPg). Wszyscy pacjenci mieli ponadto mierzoną CCT przy pomocy pachymetru ultrasonograficznego. Analiza

i u osób z nadciśnieniem (9,6 mmHg), ale w żadnej z trzech grup nie wykazano różnicy histerezy w odniesieniu do wieku. Wartości CH korelowały ponadto z CCT. Z wyjątkiem IOPcc, wysokości ciśnienia nie korelowały z CH. Zauważono, że im wyższe było CWG (IOPcc, czyli rogówkowo skompensowane), tym niższa CH. W podsumowaniu autorzy podkreślili, że CH może być użytecznym parametrem w przypadku pacjentów z jaskrą lub jej podejrzeniem [7]. Autorzy japońscy przebadali 56 pacjentów (82 oczu) z jaskrą niskiego ciśnienia i porównali ciśnienie wewnątrzgałkowe badane tonometrem aplanacyjnym Goldmanna ze zbadanym tonometrem typu ORA, którym mierzono IOPcc oraz IOPg. Ponadto wykonywano pomiary CH i CRE, a uzyskane dane odnoszono do zmian w polu widzenia. Pole widzenia określano polomierzem Humphreya przy użyciu algorytmu SITA standard w zakresie 30–2°. Wyjściowo pacjenci zostali podzieleni na 4 grupy, w zależności od stopnia uszkodzenia, natomiast pod koniec badania analizowano dwie kohorty: z szybką i z wolną progresją ubytków w polu widzenia. W obydwu ciśnienie zmierzone tonometrem Goldmanna było niższe niż zmierzone tonometrem ORA (IOPcc). Wykryto ponadto, że szybszemu postępowi zmian w polu widzenia towarzyszy niższa histereza rogówkowa – $8,4 \pm 1$ mmHg vs $9,3 \pm 1$ mmHg w grupie z wolniejszym

postępem zmian. Relatywnie szybka progresja w polu widzenia wystąpiła u pacjentów z jaskrą normalnego ciśnienia (NTG, *normal tension glaucoma*), u których stwierdzono względnie wysokie IOPcc oraz raczej niską CH, a także gdy różnica między IOPcc a ciśnieniem zmierzonym tonometrem Goldmanna (GAT) była dość wysoka. Stwierdzono zależność między progresją zmian w polu widzenia a wyższymi IOPcc i niską CH. Powyższe dane mogą także wskazywać na niedoszacowanie (zaniżanie ciśnienia) u takich pacjentów przy pomiarze tonometrem Goldmanna [3]. Podobne obserwacje przeprowadzili Congdon i wsp. Do badania włączyli 230 osób z jaskrą otwartego kąta lub jej podejrzeniem. Dwóch doświadczonych okulistów analizowało zależność między nasileniem i progresją zmian w polu widzenia a CH badaną ORA, mierzoną pachymetrem ultrasonograficznym CCT oraz współczynnikiem C/D (CDR). Powyższe dane porównywano z parametrami pola widzenia: średnią czułością siatkówki (MD, *mean defect*), standardowym odchyleniem od wzorca (PSD, *pattern standard deviation*) i morfologią połówek pola widzenia (GHT, *glaucoma hemifield test*). Analizy statystyczne wykazały, że cieńsza rogówka sprzyjała powstawaniu uszkodzeń jaskrowych, co znajdowało odzwierciedlenie w powiększeniu stosunku C/D, przy czym autorzy potwierdzili spostrzeżenia innych badaczy, że u osób rasy czarnej CCT jest statystycznie mniejsza niż u przedstawicieli rasy białej. W modelach z wieloma zmiennymi niższa wartość histerezy (ale nie CCT) wiązała się z progresją pola widzenia. Jednakże gdy do

modelu matematycznego włączono długość gałki ocznej, to zmniejszyła się rola histerezy jako istotnego czynnika ryzyka. Ale ani CH, ani CCT nie wiązały się z wartościami MD, PSD czy GHT poza granicami normy [8].

PODSUMOWANIE

Lekarze powinni być świadomi, iż wyniki uzyskane różnymi aparatami, chociaż korelują ze sobą, to nie są identyczne, dlatego badania porównawcze powinny być wykonywane na tych samych tonometrach.

Wydaje się, że po uzyskaniu większej ilości danych i ustaleniu normatywnych wartości ciśnienia wewnątrzgałkowego tonometri wykonujące oprócz pomiaru ciśnienia także analizę właściwości rogówki mogą stworzyć alternatywę dla tradycyjnego tonometru Goldmanna, a histereza rogówki okaże się cennym parametrem ułatwiającym monitorowanie jaskry i wyodrębnienie grup ryzyka, szczególnie spośród osób z ciśnieniem wewnątrzgałkowym mieszczącym się w granicach normy.

ADRES DO KORESPONDENCJI dr n. med. Małgorzata Mulak

Katedra i Klinika Okulistyki,
Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu
50-556 Wrocław, ul. Borowska 213
e-mail: xbanger@tlen.pl

Piśmiennictwo

1. European Glaucoma Society. Terminology and guidelines for glaucoma. The fourth edition. Savona, Italy 2014; 33-38.
2. Goldmann H, Schmidt T. Überapplanationstonometrie [Applanation tonometry]. *Ophthalmologica* 1957; 134(4): 221-242.
3. Hong Y, Shoji N, Morita T, et al. Comparison of corneal biomechanical properties in normal tension glaucoma patients with different visual field progression speed. *International Journal of Ophthalmology* 2016; 9(7): 973-978.
4. Berk TA, Yang PT, Chan CC. Prospective comparative analysis of 4 different intraocular pressure measurement techniques and their effects on pressure readings. *J Glaucoma* 2016; 25(10): e897-e904.
5. Miszczyk J, Karwat-Szwabowicz M, Taranek A, et al. Charakterystyka i współczesne metody pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego. *Magazyn Lekarza Okulisty* 2015; 9(6): 249-257.
6. Hager A, Loge K, Schroeder B, et al. Effect of central corneal thickness and corneal hysteresis on tonometry as measured by dynamic contour tonometry, ocular response analyser, and Goldmann tonometry on glaucomatous eyes. *J Glaucoma* 2008; 17(5): 361-365.
7. Streho M, Dariel R, Giraud JM, et al. Evaluation of the Ocular Response Analyzer in ocular hypertension, glaucoma and normal populations. Prospective study in 329 eyes. *J Fr Ophthalmol* 2008; 31(10): 953-960.
8. Congdon NG, Broman AT, Bandeen-Roche K, et al. Central corneal thickness and corneal hysteresis associated with glaucoma damage. *Am J Ophthalmol* 2006; 141(5): 868-875.
9. Mulak M, Czak W, Groberek B, et al. Pomiar ciśnienia wewnątrzgałkowego przy pomocy tonometru aplanacyjnego Goldmanna oraz tonometru rezonansowego – badania porównawcze. *Magazyn Lekarza Okulisty* 2015; 9(3): 140-144.
10. Vandewalle E, Vandenbroeck S, Stalmans I, Zeyen T. Comparison of Icare, dynamic contour tonometer and ocular response analyzer with Goldmann applanation tonometer in patients with glaucoma. *Eur J Ophthalmol* 2009; 19(5): 783-789.