



Badania elektrofizjologiczne narządu wzroku oczami elektrodziagnosty

Anna Kowalik¹, Dorota Wojtusik², Agnieszka Siennicka¹, Piotr Fryczkowski¹

¹ Przychodnia i Szpital Okulistyczny Retina, ul. Gimnazjalna 1, 01-364 Warszawa, tel. +48 22 664 44 33, e-mail: a.kowalik@retina.pl

² Specjalistyczny Okulistyczny Niepubliczny Zakład Opieki Zdrowotnej OCU SERVICE, ul. Kościelna 26, 60-538 Poznań

Wprowadzenie

Zawód elektrodziagnosty został wprowadzony w połowie lat sześćdziesiątych XX wieku. Początkowo domeną elektrodziagnostów była diagnostyka rentgenowska oraz elektromedycyna (EKG oraz EEG) [1].

Rok 2006 daje początek kształceniu w zakresie elektrodziagnostyki na poziomie uniwersyteckim. W Poznaniu na Uniwersytecie Medycznym im. Karola Marcinkowskiego powstaje na Wydziale Nauk o Zdrowiu na kierunku Zdrowie Publiczne specjalność elektrodziagnostyka, która w niedługim czasie zostaje przekształcona w kierunku o tej samej nazwie. Dało to początek rozwojowi kierunku elektrodziagnostyki w całej Polsce.

Kształcenie na poziomie uniwersyteckim pozwala lepiej zrozumieć aspekty fizyczne oraz techniczne nowych dziedzin medycyny, takich jak np. okulistyka, w których elektrodziagnosta odgrywa istotną rolę.

Jednym z badań, które elektrodziagnosta może wykonywać w okulistyce, jest elektrofizjologia narządu wzroku. Jest to badanie wymagające szczegółowej wiedzy z optyki, fizyki oraz anatomii. Odbyna się ono we współpracy z lekarzem, który interpretuje wyniki. Elektrodziagnosta czuwa nad wykonaniem badania pod względem technicznym oraz uzyskaniem diagnostycznego zapisu. Niezwykle ważna jest tu świadomość tego, jaki zapis otrzymujemy w wyniku przeprowadzonego badania, a tym samym znajomość wszelkich uwarunkowań mogących wpłynąć na badanie.

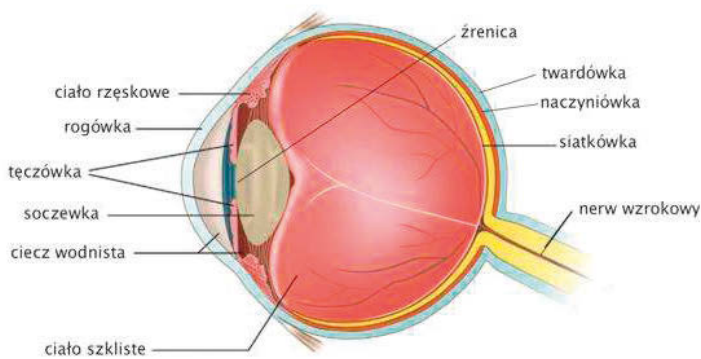
Rolą elektrodziagnosty w okulistyce jest również zorganizowanie pracowni elektrofizjologii oraz czuwanie nad przestrzeganiem zasad kontroli jakości. Zorganizowanie prawidłowo działającej pracowni elektrofizjologii wymaga współpracy z fizykiem medycznym/inżynierem medycznym ze względu na aspekty wpływające na zapis badania. Niezwykle ważne jest prawidłowe

ustawienie aparatu, wykluczając wpływ zewnętrznych źródeł, które mogą zaburzyć prawidłowy techniczny zapis.

Diagnostyka wielu schorzeń dotyczących siatkówki oraz przewodnictwa w obrębie drogi wzrokowej do początku XX wieku budziła niekiedy wiele wątpliwości do momentu pojawienia się w diagnostyce klinicznej badań elektrofizjologicznych. Najnowocześniejsze osiągnięcia techniki pozwoliły na bardzo precyzyjną rejestrację oraz analizę potencjałów elektrycznych, nawet o bardzo niskim natężeniu. Początek idei elektrofizjologii datuje się na 1849 rok, kiedy to Bois-Reymond wykrył potencjał spoczynkowy między tylnym a przednim biegunem oka, które nie było poddane stymulacji. W 1865 roku Holmgren zarejestrował różnice w potencjale oka powstającym pod wpływem pobudzenia oka światłem, a w 1880 roku Kühn i Steiner wykazali, że potencjał czynnościowy powstaje w siatkówce. Zainteresowanie badaniami elektrofizjologii oka wzrosło znacznie po publikacjach Granita w 1937 roku (Nagroda Nobla, 1967 rok), a klinicyści w 1945 roku. Pionierem badań klinicznych był Karpe [2]. W okresie powojennym w Polsce diagnostyka elektrofizjologiczna rozwijała się mniej burzliwie niż w Stanach Zjednoczonych czy w Japonii, głównie z powodu ograniczeń technicznych.

W okulistyce badania obrazowe oraz czynnościowe stanowią istotny element postępowania medycznego. Diagnostyka elektrofizjologiczna ma w wielu schorzeniach siatkówki znaczenie rozstrzygające w procesie rozpoznawczym, w innych jej wyniki przyczyniają się w dużej mierze do ustalenia prawidłowego rozpoznania. Należy jednak pamiętać, że badanie elektrofizjologiczne musi być interpretowane w kontekście wywiadu, badania perymetrii i pozostałych badań diagnostycznych [3].

Aby zrozumieć rolę badań elektrofizjologicznych, należy przyjrzeć się budowie oka oraz zasadzie jego działania. W dużym uproszczeniu oko zbudowane jest z: rogówki, soczewki, siatkówki i nerwu wzrokowego. Rogówka i soczewka pozwalają



Rys. 1 Budowa gałki ocznej człowieka
Źródło: <http://diabetyk.pl/>.

na przejście promienia świetlnego i zogniskowania go na tylnej, światłoczułej ścianie gałki ocznej – siatkówce. Z siatkówki informacja jest przekazywana poprzez nerw wzrokowy do centralnego układu nerwowego (Rys. 1).

Obserwacja zmian elektrycznych potencjałów, powstających w okolicach gałki ocznej, mięśni ocznych oraz mózgowej kory wzrokowej umożliwia szybkie, dokładne i nieinwazyjne lub minimalnie inwazyjne zdiagnozowanie zmian chorobowych zachodzących w nerwie wzrokowym i siatkówce (Rys. 2).

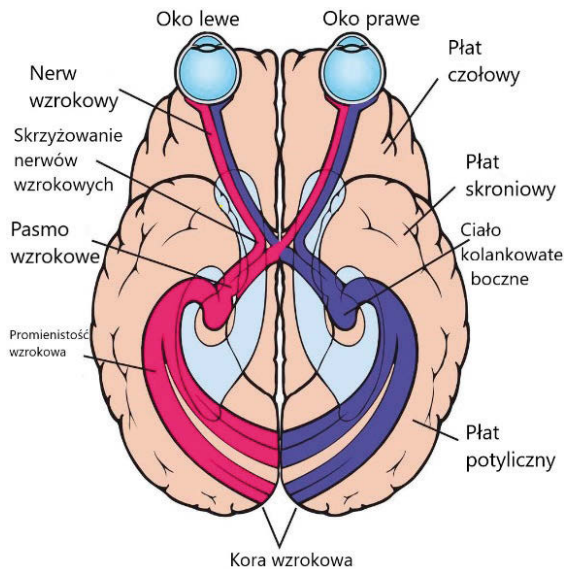
Na rysunku 3 przedstawiono poszczególne badania elektrofizjologiczne oraz poszczególne struktury, które możemy zbadać.

Jak powstaje sygnał?

W wyniku zadziałania bodźca świetlnego na narząd wzroku powstaje potencjał czynnościowy, który wywołuje przepływ prądu elektrycznego o niewielkiej wartości. Zdiagnozowanie zmian chorobowych zachodzących w nerwie wzrokowym lub siatkówce jest możliwe dzięki obserwacji zmian elektrycznych potencjałów czynnościowych powstających w okolicach gałki ocznej, mięśni ocznych oraz mózgowej kory wzrokowej.

Badanie elektrofizjologiczne stanowi bezinwazyjny pomiar potencjałów przy zastosowaniu odpowiednich elektrod. W zależności od zastosowanych elektrod i sposobu rozmieszczenia ich, a także od rodzaju mierzonych potencjałów elektrycznych wyróżniamy następujące rodzaje badań:

- elektroretinografia – ERG (*Electroretinography*),
- wywołane potencjały wzrokowe – VEP (*Visual Evoked Potential*),
- elektrookulografia – EOG (*Electrooculography*) [2, 4].



Rys. 2 Schemat drogi wzrokowej
Źródło: https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/_/viewer.aspx?path=MosbyMD&name=visual-pathway.jpg&url=https%3A%2F%2Fmedical-dictionary.thefreedictionary.com%2Fvisual%2Bpathway

OGólne zasady metodologiczne

Badanie elektrofizjologiczne wykonywane jest na specjalnie dedykowanym do tego celu sprzęcie – aparacie do elektrofizjologii.

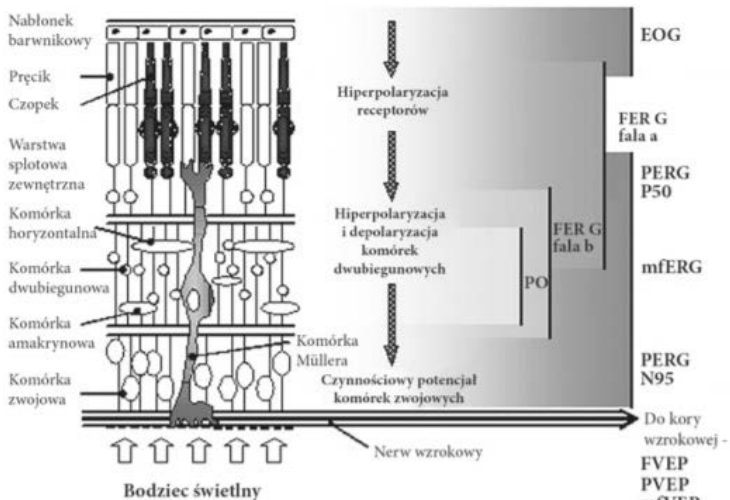
Podstawowy zestaw aparaturowy uwzględnia:

- stolik,
- dwa monitory: jeden do wyświetlania bodźca stymulującego odpowiedź (szachownica), drugi stanowi stację roboczą dla osoby wykonującej badanie,
- czaszę do stymulacji bodźcem (ganzfield),
- podpórkę na brodę do badań mfERG,
- urządzenia peryferyjne (Rys. 4).

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy zestaw do wykonania badań elektrofizjologicznych EP-1000 firmy Tomey.

Zarówno z technicznego, jak i medycznego punktu widzenia metodyka badań elektrofizjologicznych w diagnostyce okulistycznej musi uwzględniać pewne specyficzne czynniki i uwarunkowania. W szczególności powinniśmy wziąć pod uwagę:

- źródło sygnału,
- charakterystykę sygnału,
- zakłócenia,
- wymagania dotyczące stymulacji układu wzrokowego,



Rys. 3 Schematyczna budowa siatkówki oka z pokazaniem komórkowego źródła składowych morfologicznych sygnału
Źródło: http://www.okulistyka.com.pl/_okulistyka/edu/34.pdf.



Rys. 4 Aparat do wykonania badań elektrofizjologicznych
Źródło: <https://www.mdt.pl/elektrofizjolograf-ep-1000>.

- technika odprowadzenia sygnału,
- wymagania związane z bezpieczeństwem pacjenta i personelu obsługującego aparaturę,
- czynniki warunkujące wykonanie testu zależne od osoby badanej,
- potrzeby związane z normowaniem wyników badań,
- standaryzacja technik badawczych [4].

Obecne standardy ISCEV

Celem standaryzacji jest ujednoczenie metodyki badań elektrofizjologicznych narządu wzroku, co ma pozwolić na uzyskanie większej rzetelności wykonywanych badań oraz porównywalności wyników otrzymywanych w poszczególnych pracowniach wykonujących elektrofizjologię. Od 1986 roku ISCEV (*International Society for Clinical Electrophysiology of Vision*) i jego komitet standaryzacyjny – ISC (*International Standardisation Committee*) publikują kolejne standardy dotyczące najczęściej przeprowadzanych badań. Publikowane są też rekomendacje i zalecenia dla nowych, jeszcze nieobjętych unormowaniem technik badawczych, takich jak np.: mfERG (*Multifocal ERG* – elektroretinografia wieloogniskowa).

Standardy zawierają też wymagania dotyczące przygotowywania raportów zawierających wyniki badań. Ważną rolę odgrywają osobno publikowane wytyczne co do kalibracji aparatury i kontroli jakości jej parametrów technicznych, a także zalecenia dotyczące wprowadzania właściwych procedur [5].

Metodyka badania wzrokowych potencjałów wywołanych (VEP, VER) – standard VEP

Wzrokowe potencjały wywołane VEP (*Visual Evoked Potentials, Visual Evoked Response*), powstające w ośrodkach wzrokowych kory mózgowej (pole 17), są odpowiedziami elektrycznymi na

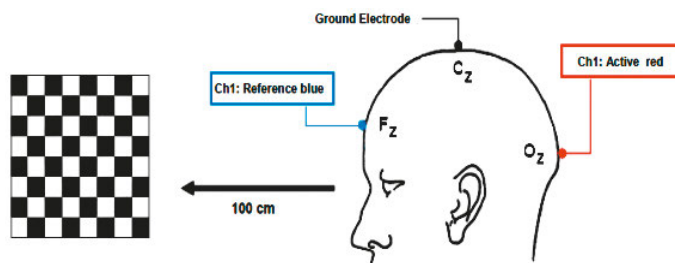
bodziec świetlny, których parametry (amplitudy, latencje fal, relacje między nimi) dostarczającą informacji o całej drodze wzrokowej, poczynając od siatkówki, aż do struktur korowych. Uważa się, że odpowiedzi te reprezentują zsynchronizowaną działaniem bodźca aktywność milionów neuronów korowych.

Sygnaly VEP odzwierciedlają pośrednio stan centralnej części siatkówki jako pierwszego poziomu w układzie wzrokowym, odpowiedzialnego za odbiór i wstępne przetwarzanie bodźców świetlnych.

W praktyce klinicznej, zależnie od rodzaju stymulacji świetlnej, wyróżnia się dwa typy odpowiedzi VEP: wzrokowe potencjały wywołane przy stymulacji błyskowej FVEP (*Flash VEP*) i przy stymulacji wzorcem PVEP (*Pattern VEP*) [2, 4, 6].

PVEP

Badanie wykonujemy zawsze dla każdego oka oddzielnie. Niebadane oko przykrywamy czarną przepaską lub w przypadku pacjentów z okularami – za okulary wkładamy przestonkę. Do badania wykorzystujemy trzy elektrody, przyklejane w odpowiednich miejscach na głowie. Pacjent siedzi naprzeciwko monitora komputerowego w odległości 80 cm. Na monitorze wyświetlana jest czarno-biała szachownica. Podczas badania szachownica porusza się, na jej środku znajduje się czerwony krzyżyk, na którym pacjent powinien skupić wzrok (Rys. 5). Jeśli pacjent nosi okulary, nie zdejmuje ich do badania. Do badania nie zakraplamy oczu. W zależności od stopnia współpracy badanie trwa ok. 10-15 minut [5]. Wykres prawidłowego zapisu *VEP Pattern* przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5 Schemat badania VEP Pattern

Źródło: Materiały z kursu elektrofizjologii Roland Hands-On-Course 2017, 07.04.2017, Berlin.

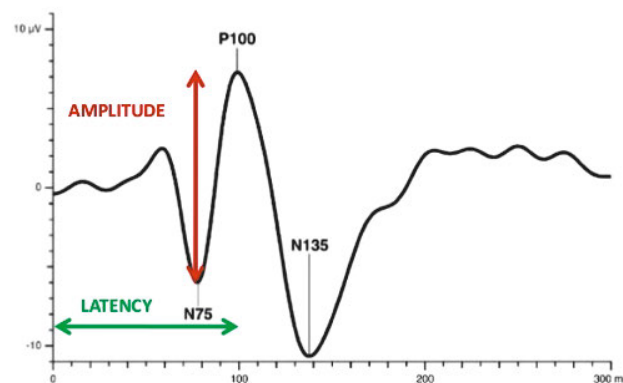


Figure 2. A normal pattern reversal VEP.

Rys. 6 Wykresy prawidłowego zapisu VEP Pattern wg standardu ISCEV

Źródło: *Documenta Ophthalmologica*.

FVEP wywołane błyskiem („flash”)

To szczególna odmiana badania VEP ze względu na rodzaj stosowanego bodźca – błysku (flash). Podczas badania pacjent opiera głowę o podbródek czaszy (w przypadku małych dzieci można badanie wykonać w niewielkiej odległości od czaszy). Podczas badania w czaszy pojawia się migoczące światło – podobne do

lampy błyskowej lub błysku flesza aparatu fotograficznego. Pacjent podczas badania patrzy na wprost przed siebie i mruga normalnie, jak zachodzi potrzeba (Rys. 7). W zależności od stopnia współpracy badanie trwa ok. 10-15 minut [2, 4, 6]. Wykres prawidłowego zapisu VEP Flash przedstawiono na rysunku 8.

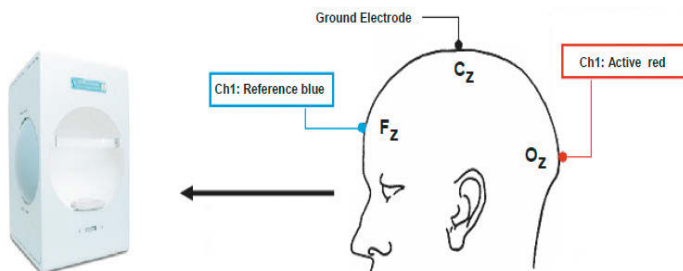
Metodyka badania elektroretinografii

Elektroretinografia ERG (*Electroretinography*) jest badaniem służącym do oceny globalnej funkcji siatkówki, w szczególności funkcji czopków i pręcików oraz komórek warstw środkowych siatkówki. Czopki pracują w średnich i wysokich natężeniach światła i są także odpowiedzialne za zdolność rozróżniania barw. Pręciki funkcjonują natomiast w niskich natężeniach światła i cechują się bardzo wysoką wrażliwością na światło. Po odpowiedniej adaptacji oka możliwe jest przeprowadzenie niezależnej oceny dla obu typów receptorów. Jeżeli zastosujemy adaptację dzienną, zwaną fotopową, działając światłem o wysokim natężeniu, uzyskamy odpowiedź czopkową. Zastosowanie adaptacji nocnej, zwanej skotopową, wyzwała aktywność pręcików, nie aktywuje natomiast czopków [2, 4].

Standardowe badanie ERG wykonywane jest według zaleceń ISCEV (*International Society of Clinical Electrophysiology of Vision*). Pierwszy standaryzowany protokół opracowano w 1989 roku. Wraz z rozwojem technologicznym ulegał on modyfikacjom znacząco po raz pierwszy w 2008 roku, a obecnie stosowana wersja wprowadzona została w 2015 roku. Obejmuje ona rozszerzenie źrenicy pacjenta, preadaptację (20 minut adaptacji nocnej przed badaniem systemu pręcikowego, 10 minut adaptacji dziennej przed zapisem odpowiedzi czopkowych), a wreszcie wykonanie poszczególnych testów z zastosowaniem fiksacji [5]. Zgodnie z tym standardem w pełnym badaniu ERG powinno się uzyskać sześć zapisów:

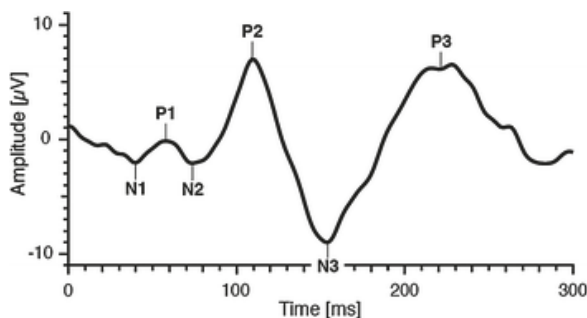
- 0.01 ERG w adaptacji nocnej (odpowiedź pręcikowa),
 - 3.0 ERG w adaptacji nocnej (tzw. odpowiedź łączona: czopkowo-pręcikowa),
 - 3.0 ERG w adaptacji nocnej (potencjały oscylacyjne, odzwierciedlającą funkcję fotoreceptorów),
 - potencjały oscylacyjne w adaptacji nocnej (pochodzące głównie z komórek amakrynowych),
 - 10.0 ERG w adaptacji dziennej (odpowiedź czopkowa, zdominowana przez te receptory),
 - 30 Hz migoczący ERG w adaptacji dziennej (odpowiedź systemu czopkowego na migoczący bodziec świetlny „flicker”).
- Badanie wykonuje się przy tzw. czaszy ganzfeld. Do badania wykorzystuje się elektrody rogówkowe (nitkowe – DTL), umieszczone na powierzchni rogówki po znieczuleniu oka. Dodatkowo stosuje się elektrody skórne – kubkowe: bierne (odniesienia), umieszczone w kącikach oczu okolicy skroniowej oraz uziemiające, zakładane na czole lub uchu osoby badanej (Rys. 9) [5, 6].

Wynikiem zapisu jest tzw. krzywa ERG, która powstaje na podstawie pomiaru potencjału czynnościowego, zmierzonego za pomocą specjalistycznych elektrod. Składowe zapisu stanowią



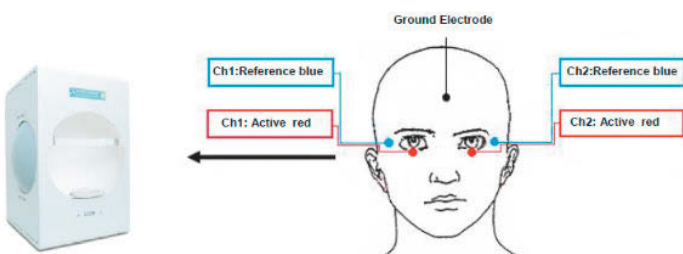
Rys. 7 Schemat badania VEP Flash

Źródło: Materiały z kursu elektrofizjologii Roland Hands-On- Course 2017, 07.04.2017, Berlin.



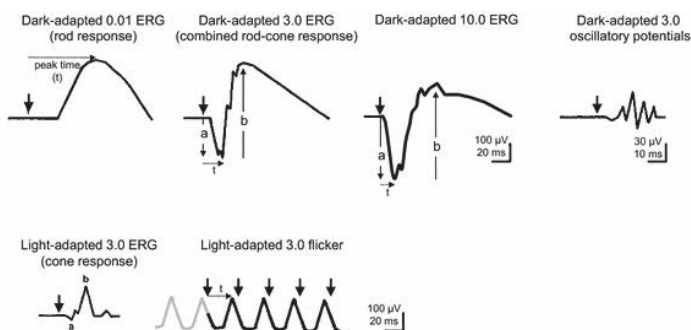
Rys. 8 Wykresy prawidłowego zapisu VEP Flash wg standardu ISCEV

Źródło: Documenta Ophthalmologica.



Rys. 9 Schemat badania elektroretinografii (ERG)

Źródło: materiały z kursu elektrofizjologii Roland Hands-On- Course 2017, 07.04.2017, Berlin.



Rys. 10 Wykresy sześciu podstawowych zapisów ERG wg standardu ISCEV

Źródło: Documenta Ophthalmologica.



wychylenia dodatnie oraz ujemne, które graficznie odzwierciedlają czynność bioelektryczną różnych części siatkówki.

Fala a jest wynikiem hiperpolaryzacji zewnętrznych członów fotoreceptorów siatkówki, tj. czopków i pręcików, na wykresie widoczna jako pierwsze ujemne wychylenie.

Fala b ma swoje źródło w warstwie jądrzastej wewnętrznej siatkówki (komórki dwubiegunowe i komórki Müllera), stanowi dodatnie wychylenie.

Fala c związana jest z hiperpolaryzacją komórek nabłonka barwnikowego (RPE) i komórek Müllera. Jest późną pozytywną odpowiedzią, jej szczyt pojawia się od 2-10 s po zadziaaniu bodźca (Rys. 10).

Główne wskazania do badania ERG stanowią: choroby siatkówki i plamki o podłożu genetycznym, toksyczne uszkodzenie siatkówki i plamki, obniżenie ostrości wzroku o niewyjaśnionej przyczynie, brak korelacji pomiędzy dolegliwościami pacjenta a obrazem klinicznym oraz ocena funkcji siatkówki przy nieprzeznaczonych ośrodkach optycznych [2, 4-6].

Metodyka badania elektroretinogramu stymulowanego wzorcem – PERG

Tradycyjny, błyskowy ERG nie reprezentuje aktywności najbardziej wewnętrznych warstw siatkówki, tj. warstwy zwojowej. Elektroretinogram u pacjentów z jaskrą i uszkodzeniem nerwu wzrokowego wykazuje normalne wartości [4]. W celu poznania funkcji komórek zwojowych siatkówki stosuje się szczególnie rodzaj badania ERG – PERG (*pattern* ERG).

PERG mierzy biopotencjały, które powstają w obrębie siatkówki na skutek stymulacji bodźcem naprzemiennej szachownicy o stałej średniej luminescencji. Ponieważ PERG stanowi lokalną odpowiedź tylko z obszaru siatkówki objętej wzorcem stymulacji, może być stosowany jako wrażliwy wskaźnik zaburzenia funkcji plamki i odzwierciedla zintegrowanie odpowiedzi fotoreceptorów, komórek dwubiegunowych i zwojowych siatkówki. Składowe zapisy PERG stanowią fala N35, P50 oraz N95. Przyjmuje się, że 70% składowej fali P50 stanowi odpowiedź z komórek zwojowych siatkówki, a pozostała część sygnału jest generowana dystalnie i obejmuje fotoreceptory czopkowe plamki. Fala N95 natomiast w 100% stanowi odpowiedź z komórek zwojowych [7].

Badanie PERG przeprowadzane jest według standardów ISCEV. Wykonuje się je w warunkach typowego oświetlenia pomieszczenia, źrenicę się nie rozszerza. Tak samo jak w przypadku badania ERG, po wcześniejszym znieczuleniu rogówki zakładane są elektrody czynne – nitkowe, elektroda odniesienia – powierzchniowa złota elektroda kubkowa, mocowana przy zewnętrznej kącie oka, oraz elektroda uziemiająca – mocowana na czole lub uchu pacjenta.

Klinicznie PERG może być zastosowany u pacjentów z nieprawidłowymi odpowiedziami PVEP w celu ustalenia, czy istnieje zaburzenie funkcji centralnej siatkówki, a zatem rozróżnienia, czy przyczyną zmian w PVEP jest choroba plamki czy choroba n. II.

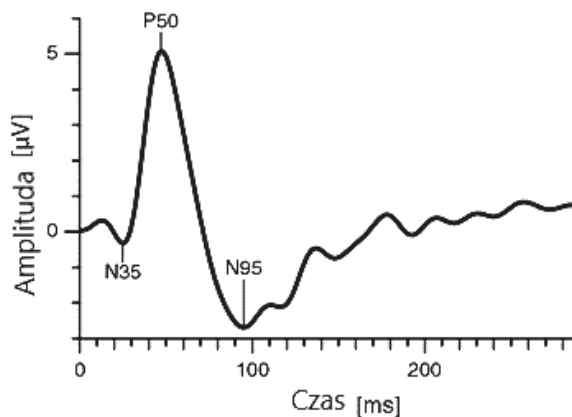
Może być również stosowany do wykrywania i monitorowania zaburzeń komórek zwojowych siatkówki powstałych z przyczyn,

takich jak jaskra, neuropatie n. II lub pierwotne choroby komórek zwojowych. Z tego powodu PERG ma wartość kliniczną zarówno w praktyce neurologicznej, jak i okulistycznej [7].

Tabela 1 Schemat postępowania dla badań elektrofizjologicznych

Normal	Normal	P50 normal N95 normal	P50 abnormal	P50 abnormal
PVEP	PVEP	PVEP	ERG	ERG
NORMAL	ABNORMAL	ABNORMAL	NORMAL	ABNORMAL
BEZ ZMIAN	DYSFUNKCJA n. II	DYSFUNKCJA n. II	MAKULOPATIA	DYSFUNKCJA SIATKÓWKI

Źródło: G.E. Holder: *Pattern Electroretinography (PERG) and Integrated Approach to Visual Pathway Diagnosis*, *Progres in Retinal and Eye Research*, 20(4), 2001, 531-561.



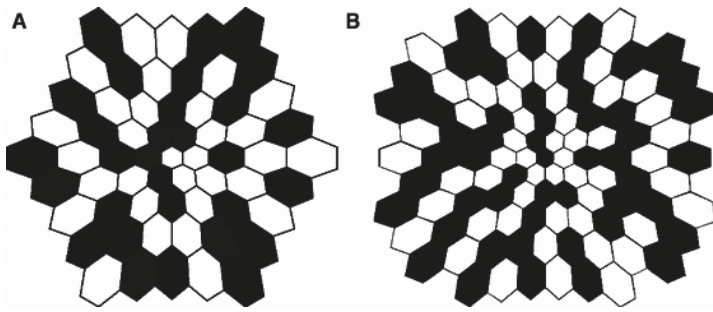
Rys. 11 Wynik zapisu PERG. Wykresy zapisu PERG wg standardu ISCEV

Źródło: *Documenta Ophthalmologica*.

Metodyka badania Multifocal ERG-mf ERG

Elektroretinogram wieloogniskowy, bo tak w pełni brzmi nazwa badania mfERG, został opracowany w celu umożliwienia topograficznego pomiaru bioelektrycznej aktywności siatkówki. Odpowiedzi te są rejestrowane za pomocą elektrod rogówkowych, podobnie jak w przypadku całopoloowego ERG. Różni je charakter bodźca i forma analizy sygnału [11]. W trakcie badania mfERG wiele obszarów siatkówki (najczęściej 61 lub 103) jest stymulowanych przez wielokrotnie powtarzane sekwencje w tym samym czasie (Rys. 12). Odpowiedzi z różnych regionów siatkówki są zapisywane jednocześnie, co stanowi ulepszenie metody elektroretinogramu błyskowego ERG, który prezentuje tylko zsumowaną odpowiedź z całej siatkówki, ale nie może zarejestrować lokalnej odpowiedzi. Należy jednak pamiętać, że przy podejrzeniu uszkodzenia dużej części siatkówki lub uszkodzeniu pręcików trzeba koniecznie wykonać ERG [13].

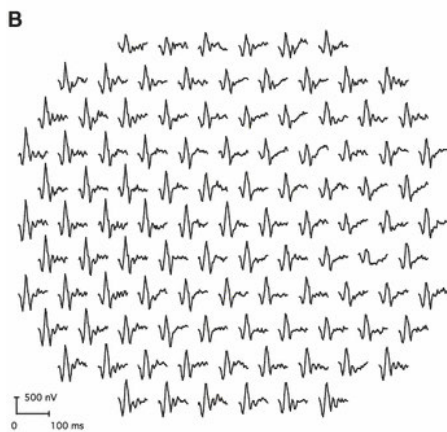
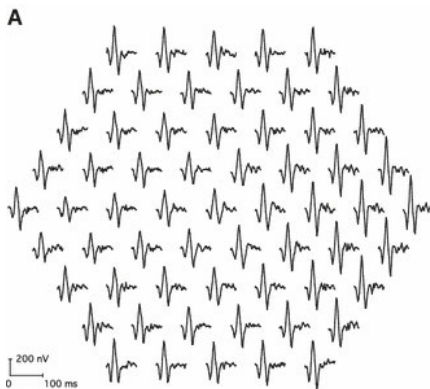
Metoda ta przedstawiona została po raz pierwszy w publikacji w 1992 roku, gdzie Sutter i Tran opisali topografie tzw. *first order kernel* (FOK) lub kernel pierwszego rzędu. FOK jest uśrednionym przebiegiem potencjału szczególnego, małego ogniska lub pola siatkówki, stymulowanego odmiennie, czyli losowo oraz niezależnie od sąsiadujących pól siatkówki [10].



Rys. 12 Prezentowany w trakcie badania mfERG układ sześciokątnych bodźców stymulujących. Na modelu A – 61 wyświetlanych sześciokątów, w układzie B – 103 sześciokąty
Źródło: Documenta Ophthalmologica.

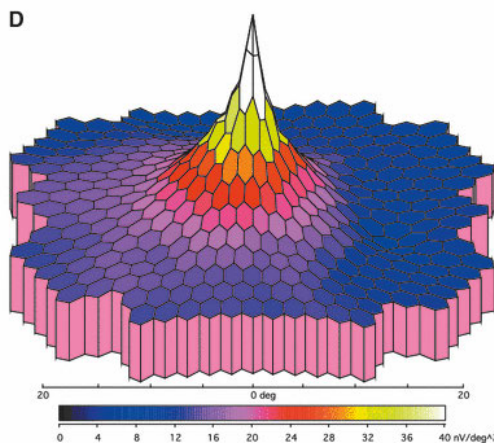
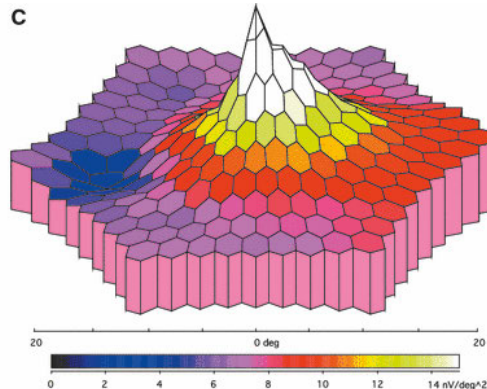
Idea wielogniskowego ERG (mfERG) jest oparta na użyciu korelacji krzyżowych z wykorzystaniem techniki niezależnych przebiegów impulsowych o charakterze binarnych ciągów pseudolosowych maksymalnej długości, tzw. m-sequences. Wielogniskowy ERG jest zbiorem odpowiedzi pochodzących z lokalnej stymulacji wielu pól siatkówkowych, wyekstrahowanych z globalnej odpowiedzi ERG drogą matematycznej redukcji.

Każda odpowiedź ogniskowa (każdego elementu mozaiki sześciokątów) jest obliczana i kreowana jako rezultat korelacji między m-sequences a cyklem odpowiedzi w jednostce czasu. Odpowiedź stanowi *first order kernel* (FOK).



Rys. 13 Zapis badania mfERG – panel A, mapa śladów z 61 sześciokątami (oko lewe) i B – 103 sześciokątami (oko prawe). C i D mapa odpowiedzi lokalnych w wersji 3D

Źródło: Documenta Ophthalmologica.



Rys. 13 Zapis badania mfERG – panel A, mapa śladów z 61 sześciokątami (oko lewe) i B – 103 sześciokątami (oko prawe). C i D mapa odpowiedzi lokalnych w wersji 3D

Źródło: Documenta Ophthalmologica.

Przebieg badania

Przygotowanie pacjenta rozpoczynamy od podania kropli rozszerzających źrenicę (roztworu 1% Tropicamidu). Przed rozpoczęciem badania należy przeprowadzić tzw. preadaptację w pomieszczeniu z normalnym oświetleniem (nie krócej niż 15 minut). Badanie przeprowadza się w warunkach tzw. przydymionego światła. W przypadku mfERG stosuje się te same elektrody jak w przypadku ERG, tj. elektrody czynne – nitkowe DTL, elektrody bierne – kubkowe, mocowane na skórze w pobliżu kącika oka oraz elektrodę uziemiającą – kubkową mocowaną na środku czoła badanego. Istotnym elementem jest korekcja wady refrakcji oka badanego. Zapewnia się pacjentowi wygodną pozycję przed ekranem monitora, z podpórką pod brodę i z regulacją wysokości siedziska krzesła. Badania wykonuje się oddzielnie dla każdego oka. Dla prawidłowego przeprowadzenia badania jest stała kontrola fiksacji pacjenta, czyli by wzrok utrzymany był w centralnym punkcie ekranu (czerwony krzyżyk). Na monitorze wyświetlane są pola o rozmiarach rosnących obwodowo. Daje to możliwość – dzięki dość skomplikowanemu systemowi obliczeń matematycznych – otrzymania 61-103 odpowiedzi (w zależności od ilości wyświetlanych pól). To z kolei umożliwia uzyskanie topograficznej mapy odpowiedzi, którą następnie można odwzorowywać w postaci pól barwnych lub w postaci tzw. obrazu 3D (Rys. 13).

Zastosowanie

Ze względu na możliwość oceny sygnału na obszarze 60 centralnych stopni siatkówki elektroretinogram wielogniskowy jest doskonałym narzędziem do wykrywania i monitorowania chorób plamki, a dokładnie obiektywnej i ilościowej ocenie funkcji czopków i pręcików [11].

Badanie mfERG wykonujemy u pacjentów w przypadku:

- dystrofii wrodzonych (choroba Stargarda, dystrofia czopkowa, choroba Besta),
- makulopatii o niewyjaśnionej etiologii,
- obniżeniu ostrości wzroku o nieznaną przyczynę,
- choroby plamki o różnej etiologii,
- zaburzenia widzenia barwnego,
- polekowe uszkodzenie plamki np. po Arachinie.

Tabela 2 przedstawia różnice pomiędzy badaniem ERG i mfERG.



Tabela 2 Różnice między badaniem ERG i mfERG

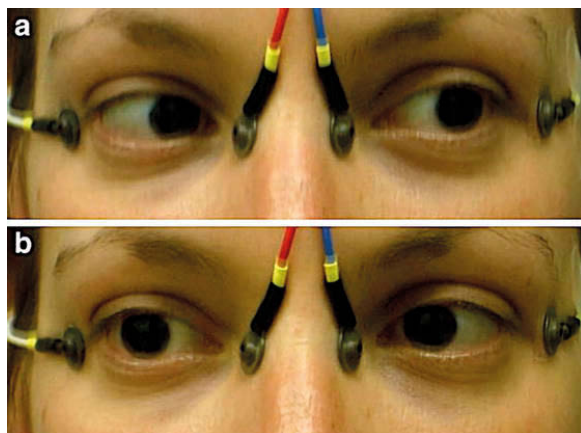
ERG	mfERG
Ocena globalną funkcję siatkówki	Topograficzny pomiar aktywności siatkówki
Odpowiedź na jeden pojedynczy bodziec (błysk świetlny)	Zbiór odpowiedzi zliczonych drogą matematycznych obliczeń
Odpowiedź okołodołkowa	Mapy lokalnych odpowiedzi regionu dołka i okolicy okołodołkowej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie standardów ISCEV.

Metodyka badania elektrookulografii EOG

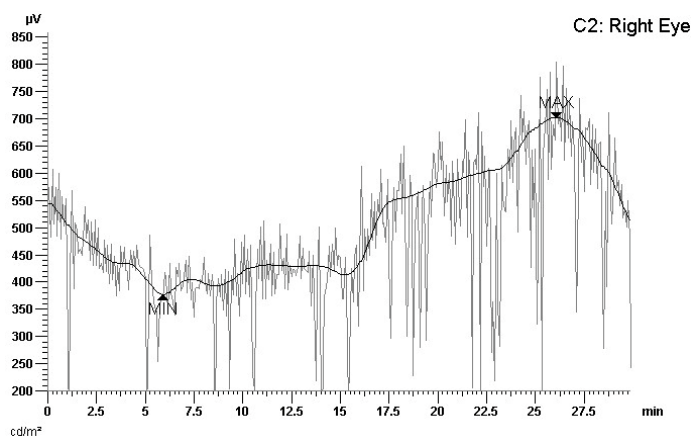
Elektrookulografia (EOG) wykorzystywana jest, podobnie jak ERG, do oceny niektórych chorób plamki żółtej. Określony potencjał czynnościowy rejestrowany jest przy wymuszonych ruchach oka, a jego amplituda zależy od położenia gałki ocznej.

EOG jest testem elektrofizjologicznym służącym ocenie funkcji zewnętrznych warstw siatkówki i nabłonka barwnikowego (RPE), który rejestruje zmiany w potencjale RPE podczas fazy ciemności i jasności [11]. Istnieje różnica w potencjale elektrycznym między przednim a tylnym odcinkiem oka, zwanym stałym potencjałem oka. Jego źródłem jest głównie nabłonek barwnikowy siatkówki. Zmiana potencjału stałego oka może być wywołana przez adaptację siatkówki do zmiany oświetlenia otoczenia [13]. Po wyłączeniu światła stały potencjał oka ulega obniżeniu przez 8 do 10 minut. Ponowne włączenie światła wywołuje obniżenie potencjału stałego oka przez 60-75 sekund. Jest to tzw. szybka oscylacja, która pojawia się na wykresie w postaci małego wychylenia fazy EOG w adaptacji fotopowej. Następnie przez kolejne 7 do 14 minut dochodzi do znacznego wzrostu potencjału. Pik świetlny jest wynikiem wzrostu poziomu wolnych jonów Ca wewnątrz komórek. Uwalniane są one z endoplazmatycznego reticulum, a regulacja ta zależy od relacji pomiędzy Bestrophiną a kanałami chlorkowymi błony podstawnej. Zmiany stałego potencjału oka w różnych warunkach oświetlenia są zależne od zmiany przepuszczalności jonów w błonie podstawnej RPE regulowanej częściowo przez gen BEST 1. Na podstawie



Rys. 14 Układ elektrod naskórných przyklejanych w kąciach oczu pacjenta. W trakcie badania pacjent wodzi wzrokiem za czerwonym punktem w lewo (zdjęcie a) i prawo (zdjęcie b)

Źródło: Documenta Ophthalmologica.



Rys. 15 Zapis badania EOG (oko prawe) za pomocą aparatu Tomey

Źródło: Pracownia Elektrofizjologii eRetina, Poznań.

wyników odpowiedzi składowej wrażliwej i niewrażliwej na światło oblicza się współczynnik Ardena [13].

Współczynnik Ardena AR (*Arden Ratio*) oznacza stosunek amplitud potencjałów w jasności (wartość maksymalnej amplitudy) do amplitud potencjałów w ciemności (wartość minimalnej amplitudy).

Wartości ocenie się następująco:

- < 1,5 nienormalnie niskie,
- 1,5-2,0 borderline, wartości subnormalne, wymagające obserwacji,
- > 2,0 wartość prawidłowa.

Na rysunku 15 przedstawiono prawidłowy wynik badania EOG.

Badanie EOG wykonuje się głównie u pacjentów ze schorzeniami, które przebiegają z zaburzeniem funkcjonowania kompleksu nabłonka barwnikowego i warstwy receptorowej siatkówki.

Przebieg badania

Badanie wykonywane jest przy rozszerzonej źrenicy. Pierwszym etapem jest preadaptacja w świetle pokojowym (jasne pomieszczenie) około 30 minut przed badaniem. Elektrody przykleja się na skórę przy kąciach oczu, po dwie dla każdego oka oraz jedną elektrodę uziemiającą na środku czoła. Pacjent siedzi z głową opartą o podpórkę w czaszy i porusza oczami za zapalającymi się czerwonymi diodami. Przez 15 sekund każdej minuty badania, podążając za światłami, wykonuje naprzemienne ruchy oczami prawa-lewa. 30 pozostałych sekund to przerwa. Badanie trwa 30 minut i składa się z 2 faz: 15 minut w jasności, 15 w ciemności.

Podsumowanie

Badania elektrofizjologiczne narządu wzroku stanowią cenny aspekt diagnostyczny w okulistyce. Wymagają one nie tylko czasu, ale także i szerokiej wiedzy na temat rejestracji i analizy biosygnalu. Prawidłowo przeprowadzone pozwalają na diagnozowanie i monitorowanie wielu jednostek chorobowych związanych z całą drogą wzrokową.

Tabela 3 przedstawia porównanie warunków technicznych dla poszczególnych badań elektrofizjologicznych narządu wzroku.

Tabela 3. Porównanie warunków technicznych dla badań elektrofizjologicznych narządu wzroku

	PVEP	FVEP	ERG	PERG	mfERG	EOG
Bodziec	Szachownica	Błysk świetlny	Błysk świetlny	Szachownica	61 lub 103 sześciiany (naprzemiennie białe czarne)	Rejestrowany potencjał spoczynkowy w fazie ciemności i jasności
Warunki	Szachownica na monitorze	Badanie w czaszy Ganzfeld	Preadaptacja 20 minut do ciemności, 10 minut adaptacja do jasności; badanie w czaszy Ganzfeld	Szachownica na monitorze	61 lub 103 sześciiany (naprzemiennie białe-czarne) na monitorze	Badanie w czaszy Ganzfeld z wyświetlaną naprzemiennie (prawo-lewo) czerwoną lampką
Zapis	Jednookny	Jednookny	Obuoczny	Jednookny	Jednookny	Obuoczny
Elektrody	Naskórne (aktywna, bierna, uziemiająca)	Naskórne (aktywna, bierna, uziemiająca)	Rogówkowe i naskórne (2 aktywne, 2 bierne, 1 uziemiająca)	Rogówkowe i naskórne (2 aktywne, 2 bierne, 1 uziemiająca)	Rogówkowe + naskórne (2 aktywne, 2 bierne, 1 uziemiająca)	Naskórne (2 aktywne, 2 bierne, 1 uziemiająca)
Żrenica	Wąska	Wąska	Rozszerzona	Wąska	Rozszerzona	Rozszerzona
Korekcja	Pełna korekcja	Brak	Brak	Pełna korekcja	Pełna korekcja + dodatkowo + 3D	Brak
Czas badania	10 minut	10 minut	40 minut/1 godzina	20 minut	40 minut/1 godzina	1 godzina

Źródło: Opracowanie własne na podstawie standardów ISCEV.

Literatura

- http://www.zckziu.pl/aktualnosci-artykul-technik-elektroradiolog.html.
- A. Hulewicz: *Badania elektrofizjologiczne w diagnozowaniu wybranych schorzeń narządu wzroku*, Acta Bio-Optica et Informatika Medica - Inżynieria Biomedyczna, 17, 2011, 67-71.
- D. Wojtusik: *Rola elektroradiologa w diagnostyce chorób oczu*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 3, 2015, 159-162.
- O. Palacz, W. Lubiński, K. Penkala: *Elektrofizjologiczna diagnostyka kliniczna układu wzrokowego*, Oftal, Warszawa 2003.
- http://www.iscev.org/
- W. Gosławski, W. Lubinski: *Badanie elektrofizjologiczne w okulistycznej praktyce klinicznej. Część II Diagnostyka nabłonka barwnikowego i siatkówki*, Okulistyka. Kwartalnik medyczny, 3, 2016.
- M.F. Marmor, A.B. Fulton, G.E. Holder, et al.: *ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography: 2008 update*, Doc Ophthalmol., 118, 2009, 69-77.
- M. Bach, M.G. Brigell, M. Hawlina et al.: *ISCEV standard for clinical pattern electroretinography (PERG): 2012 update*, Doc Ophthalmol 126, 2013, 1-7.
- W. Gosławski, W. Lubinski: *Badanie elektrofizjologiczne w okulistycznej praktyce klinicznej. Część I Diagnostyka nerwu wzrokowego i drogi wzrokowej*, Okulistyka. Kwartalnik medyczny, 2, 2016.
- E.E. Sutter: *The fast m-transform: a fast computation of cross-correlations with binary m-sequences*, Siam. J. Comput., 20, 1991, 686-694.
- O. Palacz, W. Lubiński, K. Barny: *Diagnostyka elektrofizjologiczna w chorobach i dysfunkcjach plamki ze szczególnym uwzględnieniem jej zwyrodnienia starczego*, Okulistyka, 2, 2002.
- D.C. Hood, M. Bach, M. Brigell, D. Keating, M. Kondo, J.S. Lyons, M.F. Marmor, D.L. McCulloch, A.M. Palmowski-Wolfe: *ISCEV standard for clinical multifocal electroretinography (mfERG)*, International Society For Clinical Electrophysiology of Vision, Doc Ophthalmol., 124, 2012, 1-13.
- P.A. Constable, M. Bach, L.J. Frishman, B.G. Jeffrey, A.G. Robson: *ISCEV Standard for clinical electro-oculography*, Documenta Ophthalmologica, 134, 2017, 1-9.

reklama

SZKOLENIA SPECJALISTYCZNE IOR, ORP, OA

SZKOLENIA
<http://szkolenia.ifj.edu.pl>

**Inspektor Ochrony Radiologicznej
w pracowniach stosujących aparaty rentgenowskie
w celach medycznych, szkolenia typu: R, S**

**Ochrona Radiologiczna Pacjenta
LR, LMN, LRZ, LIX, LST, FT, PMN, LRT**

**Operator Akceleratora
typu A-A i S-A**

Copyright © LADIS

**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. H. Niewodniczańskiego PAN**

ul. Radzikowskiego 152 tel.: 12 662 84 57
31-342 Kraków 12 662 83 32
e-mail: szkolenia@ifj.edu.pl fax: 12 662 81 58