

# Zawroty głowy zależne od MRI

## MRI related vertigo

WALDEMAR NAROŻNY, JERZY KUCZKOWSKI, ANDRZEJ SKOREK

Katedra i Klinika Otolaryngologii, Gdański Uniwersytet Medyczny

Rezonans magnetyczny jest bezpieczną, nieinwazyjną metodą badania coraz częściej stosowaną we współczesnej diagnostyce klinicznej. Obserwuje się tendencję do wdrażania do praktyki skanerów MRI o coraz większej sile, czemu towarzyszą doniesienia o potencjalnych efektach ubocznych oddziaływania pola magnetycznego o wysokiej częstotliwości na ustrój człowieka, m.in. w postaci pobudzenia układu przedsionkowego.

Autorzy krótko przedstawiają historię badań nad MRI, zarysowują metodę działania skanerów MRI, opisują użyteczność tej metody w otoneurologii oraz subiektywne i obiektywne efekty oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy. Osoby przebywające w polu magnetycznym zgłaszają przejściowe kłopoty z koncentracją, metaliczny smak w ustach, zawroty głowy, błyski świetlne zgodne z fazą szybką oczopląsu.

Omówione zostają także hipotetyczne mechanizmy oddziaływania pola magnetycznego na błędnik, w tym najbardziej prawdopodobny oparty na działaniu siły Lorentza oraz próby zastosowania pola magnetycznego w rozpoznawaniu, leczeniu i rehabilitacji zawrotów głowy i zaburzeń równowagi.

Przedstawione omówienie wpływu MRI na układ przedsionkowy jest pierwszą polskojęzyczną publikacją poświęconą temu zagadnieniu.

**Słowa kluczowe:** rezonans magnetyczny, pole magnetyczne, siła Lorentza, ruchy gałek ocznych, zaburzenia przedsionkowe, zawroty głowy

Magnetic resonance imaging is a safe, non-invasive test method increasingly used in modern clinical diagnostics. There is a tendency to implement more and more powerful MRI scanners into practice, which is accompanied by reports of potential side effects of high-frequency magnetic field impact on the human body, including in the form of excitation of the vestibular system.

The authors briefly present the history of MRI research, outline the method of operation of MRI scanners, describe the usefulness of this method in otoneurology, and the subjective and objective effects of the magnetic field on the vestibular organ. People in the magnetic field report temporary difficulty concentrating, metallic taste in the mouth, dizziness, light flashes consistent with the rapid phase of nystagmus

Hypothetical mechanisms of the magnetic field impact on the labyrinth are also discussed, including the most likely based on Lorentz force and attempts to apply the magnetic field in the diagnosis, treatment and rehabilitation of dizziness and balance disorders.

The discussion on the influence of MRI on the vestibular system presented is the first Polish-language publication devoted to this issue.

**Key words:** magnetic resonance imaging, magnetic fields, Lorentz force, eye movements, vestibular dysfunction, vertigo

© Otorinolaryngologia 2019, 18(2): 45-51

www.mediton.pl/orl



Adres do korespondencji / Address for correspondence

Prof. dr hab. med. Waldemar Narożny  
Katedra i Klinika Otolaryngologii  
Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego  
ul. Smoluchowskiego 17, 80-216 Gdańsk  
tel. 58 3493393; fax: 058 3493120; e-mail: naroznyw@wp.pl

Rezonans magnetyczny (*magnetic resonance imaging*, MRI), jest nieinwazyjną metodą obrazowania wykorzystującą promieniowanie jonizujące, pozwalającą na uzyskiwanie szczegółowych danych dotyczących zarówno anatomii jak i funkcjonowania poszczególnych narządów ciała.

### Historia MRI

Historia MRI zaczyna się w roku 1938 odkryciem zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego przez Isidora Rabiego. W 1946 roku Felix Bloch i Edward Mills Purcell rozszerzyli tę metodę do badań cieczy i ciał stałych. Zauważyli oni, że na jądra atomowe

umieszczone w silnym polu magnetycznym można działać falami radiowymi o ściśle określonej częstotliwości. Jądra absorbują energię tych fal radiowych, a potem oddają ją – emitując fale o tej samej częstotliwości. Za to odkrycie zostali uhonorowani nagrodą Nobla w 1952 r.

Za twórcę pierwszego skanera MRI uważany jest Raymond Damadian, który w roku 1971 opublikował w *Science* pracę zatytułowaną „*Tumor detection by nuclear magnetic resonance*” [1]. W 1973 roku amerykański chemik Paul Lauterbur przedstawił pierwsze obrazy uzyskane metodą MRI, a w 1974 r. opublikował uzyskane tą metodą przekroje poprzeczne żywej myszy. W 1977 r. Damadian uzyskał pierwsze skany ludzkiego ciała stosując skaner MRI o sile 0,2 T. W stosowanej wówczas aparaturze dane potrzebne do uzyskania pojedynczego obrazu były zbierane przez około 5 minut. Do 1986 roku przy niewielkim spadku jakości obrazu czas ten został zredukowany do około 5 sekund. W 2003 roku po kilkudziesięciu latach od odkrycia zjawiska, jakim jest rezonans magnetyczny Paul Lauterbur i angielski fizyk Peter Mansfield otrzymali nagrodę Nobla za „odkrycia dotyczące obrazowania metodą rezonansu magnetycznego”.

Od chwili powstania na początku lat siedemdziesiątych XX w. pierwszego urządzenia medycznego wykorzystującego zjawisko rezonansu magnetycznego do chwili obecnej dokonał się olbrzymi skok technologiczny w tej dziedzinie (między innymi związany ze zwiększeniem siły pola magnetycznego z 0,6 T w latach siedemdziesiątych, 1,5 T w latach osiemdziesiątych, 3 T na przełomie wieków, do 7 T w 2010 r.) umożliwiającą poszerzenie wskazań klinicznych m.in. o obrazowanie czynnościowe (fMRI) czy spektroskopię. Szacuje się, że do 2014 roku na świecie było w użyciu 45 skanerów o sile powyżej 7 T, z czego pojedyncze o sile 9,5-11,7 T. Były one stosowane głównie w realizacji badań naukowych [2]. Siła tych urządzeń jest kilkadziesiąt tysięcy razy silniejsza niż wynosi pole magnetyczne Ziemi. Najsilniejszy impuls pola magnetycznego wytworzony w 1998 r. w instytucie VNIIEF w Sarow w Rosji wynosił 2800 T. Liczba wykonywanych na świecie klinicznych badań obrazowych z użyciem MRI stale wzrasta. Ze sporządzonego w 2013 r. przez OECD raportu wynika, że do roku 2009 wykonano na świecie 200 mln badań nie obserwując istotnych biologicznych bezpośrednich efektów ubocznych tej procedury [3]. W Polsce pierwsze urządzenie MRI o mocy 0,6 T zostało uruchomione w 1991 r. W praktyce klinicznej najczęściej wykorzystywane są urządzenia o sile 1,5 T oraz 3 T.

## Badania MRI w otoneurologii

W przypadkach zawrotów głowy diagnostyka MRI jest niezbędna, gdy wywiad i badanie przedmiotowe niedwuznacznie wskazują na: zawroty pochodzenia naczyniowego (przemijający atak niedokrwienny lub udar), guz mózgu (objawy wzmożonego ciśnienia śródczaszkowego i zmiany ogniskowe w badaniu neurologicznym), stwardnienie rozsiane, padaczkę, uraz głowy z objawami ogniskowymi lub cechami nadciśnienia śródczaszkowego.

Ponadto jest konieczna, gdy zawroty głowy cechują się ostrym początkiem, gdy zawrotom głowy towarzyszą bóle głowy, objawy neurologiczne, zaburzenia słuchu inne niż w chorobie Ménière’a. Obecnie coraz częściej, z zastosowaniem dedykowanego protokołu, bada się także pacjentów z podejrzeniem choroby Ménière’a.

Badania obrazowe nie są konieczne gdy obraz chorobowy wskazuje na: zapalenie nerwu przedstonkowego, łagodne napadowe położeniowe zawroty głowy, migrenę bądź zawroty głowy o podłożu nerwicowym, lękowym bądź depresyjnym [4].

## Podstawowe zasady działania MRI a bezpieczeństwo metody

Człowiek w codziennym życiu jest ciągle narażony na działanie pola magnetycznego pochodzącego choćby od Ziemi, jednak jego działanie jest znikome i nieszkodliwe. Co się dzieje w przypadku narażenia na silniejsze pole magnetyczne, np. w pracowniach diagnostycznych? Istnieją ciągle obawy dotyczące bezpieczeństwa w zależności od rodzaju pola magnetycznego i jego indukcyjności, dotyczące m.in. pola statycznego, pola częstotliwości radiowej i gradientowego pola magnetycznego wykorzystywanego do kodowania przestrzennego.

Aparat rezonansu magnetycznego jest zbudowany z magnezu stałego generującego stałe pole magnetyczne (*static magnetic field*, SMF), cewek pola gradientowego generujących zmienne pole magnetyczne (*time-varying magnetic field*, TVMF) oraz cewek nadawczych i odbiorczych służących do wysyłania i zbierania sygnału. Podczas pracy aparatu aby otrzymać zmienne pole magnetyczne stosuje się szybkie przełączenia pól gradientowych, które dodatkowo generują prądy wirowe w osłonie elektromagnesu. Aby je zniwelować i uzyskać jednorodne pole magnetyczne stosuje się dodatkowe zestawy cewek [5].

Wchodząc do pracowni MRI wchodzimy w zasięg silnego pola magnetycznego pochodzącego od magnezu zbudowanego najczęściej z cewek nadprzewodzących. Linie sił pola układają się w sposób

kulisty począwszy od komory MRI (gantry) i maleją wraz ze wzrostem odległości od magnesu.

Ciało człowieka składa się głównie z cząstek wody, a więc głównie z protonów charakteryzujących się dwiema właściwościami fizycznymi: momentem siły (obrotowym) wynikającym z posiadania masy oraz momentem magnetycznym wynikającym z posiadania ładunku elektrycznego. Protony w zewnętrznym polu magnetycznym zachowują się jak małe magnesy, tzn. oscylują i ustawiają się równoległe lub anty równoległe do linii sił pola. Wykonują w ten sposób precesje wokół linii zewnętrznego pola magnetycznego. Częstotliwość tych ruchów jest tym wyższa, im wyższe jest natężenie pola magnetycznego, zgodnie z równaniem Larmora [5].

Na skutek działania zmiennego pola magnetycznego wewnątrz ciała indukowane jest pole elektryczne spowodowane działaniem siły Lorentza i siły Faradaya. Prądy indukowane w ciele człowieka mogą powodować różnego typu zmiany fizjologiczne lub termiczne, m.in. pobudzenie układu przedślonkowego.

### Ograniczenia w wykonywaniu badań MRI

Ze względu na występujące w komorze skanera MRI wysokie pole magnetyczne bezwzględnie przeciwwskazane jest wykonywanie rezonansu magnetycznego u osób z ferromagnetycznymi ciałami obcymi, np. z implantami ortopedycznymi wykonanymi z metalu czy opiłkami / odłamkami metalu w ciele. Przeciwwskazania względne dotyczą m.in. rozruszników serca, implantów ślimakowych czy neurostymulatorów (np. przeciwbólowych czy mózgu) starego typu. Obecnie większość implantów, klipsów, np. używanych do zamykania tętniaków naczyń mózgowych, jest produkowana z materiałów kompatybilnych z rezonansem. Szczegółowe zasady bezpieczeństwa wykonywania badań MRI, w tym także podawania środków kontrastowych, określone są w regularnie aktualizowanych wytycznych Europejskiego Towarzystwa Radiologii Układu Moczowo-Płciowego (ESUR) [6].

### Oddziaływanie MRI na człowieka

Nad bezpieczeństwem zarówno pacjentów poddawanych badaniu rezonansem magnetycznym jak i personelu pracowni czuwa wiele instytucji. Parlament Europejski w dyrektywie nr 40 z 2004 r. określił dla pracowników przebywających w zasięgu pola magnetycznego minimalne warunki zapewniające im bezpieczeństwo zdrowotne [7]. Podobne zalecenia wydała w 2006 r. Światowa Organizacja Zdrowia a w latach 2009 r. i 2014 r. Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony Przed Promieniowaniem

Niejonizującym [8-10]. W 2014 r. amerykańska FDA (ang. *Food and Drug Administration*) określiła jako bezpieczne urządzenia MRI o sile do 8 T [11].

Dowodem na skuteczność powyższych działań prewencyjnych jest brak informacji o udokumentowanym, uszkadzającym, trwałym oddziaływaniu pola magnetycznego na ustrój człowieka. Niemniej w 2018 r. Bongers i wsp. badając 538 pracowników fabryki produkującej skanery MRI dostrzegli związek ich ekspozycji na wysokie pole magnetyczne z rozpoznaniem u części z nich nadciśnieniem tętniczym [12].

Od wielu lat, m.in. ze względu na wzrastającą siłę stosowanych urządzeń prowadzone są na całym świecie badania *in vitro* i *in vivo* materiału genetycznego komórek poddawanych działaniu pola magnetycznego. Wyniki tych badań pozostają jednak niejednoznaczne, grupy badane są małe, brak jest wiarygodnych grup porównawczych [13].

Część osób przebywających w polu magnetycznym zgłasza przejściowe kłopoty z koncentracją, metaliczny smak w ustach, zawroty głowy, błyski świetlne zgodne z fazą szybką oczopląsu (*phosphenes*) [14-17]. Może to dotyczyć zarówno osób badanych (chorych i zdrowych) jak i personelu obsługującego urządzenie [18-22]. Zdrowi ochotnicy badani w 2015 r. przez Friebe i wsp. w urządzeniu o sile 7 T najczęściej zgłaszali: zawroty głowy (38,6%), *phosphenes* (18,2%), uderzenia gorąca (15%), uczucie oszołomienia (13,6%) [23].

Grupami zawodowymi szczególnie narażonymi na oddziaływanie pola magnetycznego wyzwalanego przez skanery MRI jest personel techniczny i medyczny obsługujący te urządzenia oraz lekarze i pielęgniarki pionu anestezjologicznego [24, 25].

### Objawy subiektywne oddziaływania MRI na narząd przedślonkowy

Osoby, które zgłaszały zawroty głowy podczas przebywania w polu magnetycznym informowały, że uczucie niestabilności zmniejszało się wraz z czasem oddziaływania tego czynnika [16]. Roberts i wsp. oraz Mian i wsp. przeprowadzając eksperymenty w ciemności w polu magnetycznym 7 T zauważyli u badanych szybkie ustępowanie przedślonkowych dolegliwości subiektywnych przy utrzymywaniu się oczopląsu [26, 27]. Kierunek wrażenia obrotu ciała był czasami trudny do określenia i często niezgodny z kierunkiem oczopląsu, co mogło mieć związek ze stymulowaniem różnych części błędniaka [26]. Szybkie ustępowanie wrażenia obrotu (rotacji) ciała w polu magnetycznym wiązany był z procesem centralnej adaptacji [26-28]. Henrich i wsp. zauważyli częstsze występowanie zawrotów głowy u kobiet niż u mężczyzn [29].



### Badania nad wpływem pola magnetycznego na narząd przedsionkowy zwierząt

Badania doświadczalne nad wpływem pola magnetycznego na narząd przedsionkowy zwierząt (myszy, szczurów) prowadzone są od początku XXI w. z użyciem urządzeń o dużej sile (7-14 T). Wyniki prowadzonych w 2009 r. przez Casona i wsp. badań doświadczalnych na szczurach sugerowały istnienie oddziaływania pola magnetycznego na błędnik [30]. Wyniki badań Houpta i wsp. oraz Warda i wsp. potwierdzają rolę siły Lorentza w oddziaływaniu pola magnetycznego na narząd przedsionkowy [31-33].

### Badania nad wpływem pola magnetycznego na ruchy gałek ocznych człowieka

Obiektywizacja subiektywnych dolegliwości związanych z oddziaływaniem pola magnetycznego na układ równowagi nastąpiła dopiero w pierwszej dekadzie XXI. Patel i wsp. w 2008 r. jako pierwsi, używając elektronystagmografu, badali przez wiele miesięcy ruchy gałek ocznych techników pracujących w pobliżu MRI o sile 9,4 T. Badania były prowadzone poza miejscem oddziaływania pola magnetycznego. Stwierdzone niespecyficzne, sprzeczne zmiany w zapisach ENG były zbliżone do uzyskiwanych u osób zdrowych [34].

Marcelli i wsp. w 2009 r. przypadkowo, badając wpływ prób kalorycznych na zapis fMRI, zaobserwowali u części badanych znajdujących się w ciemności w polu magnetycznym 1,5 T, przed rozpoczęciem próby kalorycznej, powolne ruchy gałek ocznych [35].

Te obserwacje zachęciły w 2011 r. Robertsa i wsp. do przeprowadzenia badania ruchów gałek ocznych u zdrowych osób znajdujących się w ciemności (zniesienie fiksacji) w wysokim (7 T) polu magnetycznym [27]. Wykazali oni:

- występowanie oczopląsu poziomego u osób badanych;
- zmianę kierunku oczopląsu w zależności od ułożenia badanej osoby (wjazd do komory MRI głową vs. stopami);
- obecność oczopląsu w trakcie całego pobytu badanych w wysokim polu magnetycznym;
- zależność natężenia oczopląsu od siły pola magnetycznego;
- brak oczopląsu u chorych z obustronnym wypadnięciem błędników.

Badania Henricha z 2013 r. nad subiektywną oceną zawrotów głowy wyzwalanych u osób znajdujących się w polu magnetycznym o różnej sile (1,5 T, 3 T, 7 T) nie wykazały istotnych różnic w badanych grupach [36]. Roberts i wsp. zauważyli

wzrost prędkości oczopląsu (objawu obiektywnego) wraz ze wzrostem siły pola magnetycznego [27].

Mian i wsp. w 2016 r. stwierdzili zależność kierunku i wielkości oczopląsu obecnego u osób znajdujących się w polu magnetycznym 7 T od ustawienia (orientacji) głowy. Pochylenie głowy ku przodowi zmieniało intensywność oczopląsu poziomego; przechylenie głowy do boku (ku ramieniu) wywoływało oczopląs pionowy [37].

Ostatnie badania przeprowadzone przez Pawlak-Osińską i wsp. [21] na 12 zdrowych ochotnikach z użyciem stałego pola magnetycznego o sile 3 T potwierdziły zgodność kierunku oczopląsu z kierunkiem przesuwania się stołu skanera oraz wyższą amplitudę i prędkość oczopląsu w polu magnetycznym w porównaniu ze stymulacją linearną u tych samych chorych.

Pierwszego zapisu oczopląsu, u 35-letniego zdrowego ochotnika przebywającego przez 90 minut w polu magnetycznym 7 T, dokonali w 2016 r. Ward i wsp. [38]. W opinii tych autorów pobudzenie błędnika znajdującego się w polu magnetycznym wytwarzanym przez skaner MRI jest spowodowane interakcją płynów ucha wewnętrznego i naturalnych sił stałego pola magnetycznego. Odtworzenie oczopląsu zapisanego przez Warda i wsp. jest możliwe na stronie [www.nejm.org](http://www.nejm.org) w zakładce „*images in clinical medicine*”.

### Mechanizmy oddziaływania pola magnetycznego na błędnik (hipotezy)

We wczesnych latach osiemdziesiątych XX w. próby wyjaśnienia oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy człowieka oparte były na przekonaniu obecności w nim, podobnie jak u ryb, cząstek żelaza [39, 40]. W błędniku ssaków takich elementów jednak nie znaleziono.

W roku 2007 Glover i wsp. przedstawili trzy hipotezy próbujące wyjaśnić mechanizmy oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy:

- wyzwalamie sił między wrażliwymi diamagnetycznie strukturami błony otolitowej lub osklepka a otaczającymi tkankami ucha wewnętrznego;
- wzbudzanie prądu elektrycznego (zgodnie z prawem Faradaya);
- wzbudzanie w płynach ucha wewnętrznego sił magneto-hydrodynamicznych doprowadzających do ruchu śródchłonki [41].

W 2011 r. Roberts i wsp., w oparciu o własne obserwacje, zaproponowali czwartą hipotezę mechanizmu oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy opartą na sile Lorentza [27].

## Siła Lorentza

Siła Lorentza to siła, jaka działa na cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym, poruszającą się w polu elektromagnetycznym.

Według tej hipotezy silne pole magnetyczne wytwarza siłę Lorentza prostopadłą do linii pola wyzwalającą ruch jonów śródchłonki wyginających rzęski znajdujące się na komórkach zmysłowych osklepka. Następuje otwarcie kanałów potasowych, napływ jonów potasu, depolaryzacja błony komórkowej, otwarcie kanałów wapniowych, połączenie pęcherzyków synaptycznych z błoną cytoplazmatyczną, uwolnienie neuroprzekazników do szczeliny synaptycznej i pobudzenie włókien aferentnych doprowadzając do oczopląsu. W 2012 r. Antunes i wsp. przy użyciu uproszczonego modelu ucha wewnętrznego udało się obliczyć wartość ciśnienia na osklepku tworzonego przez przepływ śródchłonki uruchamianej przez siłę Lorentza w uchu wewnętrznym znajdującym się w statycznym polu magnetycznym o wartości 7 T. Powinno ono wynosić 1,6 mPa [42]. Według Omana i wsp. do wywołania oczopląsu wystarczy ciśnienie 0,1 mPa [43]. Glover i wsp. dwa lata później wykazali zbieżność modelu tego mechanizmu przedstawionego przez Antunes i wsp. ze zmianami obserwowanymi podczas stymulacji kalorycznej błędniaka [44].

Najczęściej obserwowany jest oczopląs poziomy wskazujący na bodźcowanie kanału półkolistego bocznego [27, 45]. Oś pola magnetycznego skanera MRI jest ustawiona północ-południe. Kierunek oczopląsu zmienia się wraz ze zmianą ustawienia głowy badanego względem osi pola magnetycznego skanera. Siła Lorentza wyzwala u chorego wprowadzonego do komory urządzenia głową – oczopląs prawostronny, u chorego wprowadzonego do komory urządzenia stopami – lewostronny [27, 45].

Mimo, że hipoteza mechanizmu oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy opartego na sile Lorentza wydaje się najbardziej wiarygodna to trwają dalsze badania nad zgłębieniem mechanizmów oddziaływania pola magnetycznego na narząd przedsionkowy [46].

## Próby zastosowania pola magnetycznego w rozpoznaniu, leczeniu i rehabilitacji zawrotów głowy i zaburzeń równowagi

Obserwacja wpływu pola magnetycznego na układ przedsionkowy (oczopląsu, zaburzeń równowagi) otwiera nowe możliwości badań nad fizjologią układu równowagi człowieka, zwłaszcza jego zdolnościami adaptacyjnymi [21, 44] zarówno w diagnostyce schorzeń ucha wewnętrznego jak i w monitorowaniu farmakoterapii chorób tego narządu.

Shaikh i wsp. w 2012 r. wykazali przydatność precyzyjnego ustawiania głowy znajdującej się w polu magnetycznym do selektywnej stymulacji różnych par kanałów półkolistych [47]. Zmiana ustawienia głowy w taki sposób, aby umieścić określony kanał półkolisty w pozycji prostopadłej do kierunku sił Lorentza doprowadza do powstania oczopląsu wyzwalanego ze stymulowanego kanału. Może stać się to przydatne np. w wyborze najskuteczniejszej metody rehabilitacji u chorych z łagodnymi napadowymi położeniowymi zawrotami głowy.

Według Mian i wsp. magnetyczna stymulacja przedsionków może stać się ważnym testem czynności łagiewki, ważnej a jednocześnie najtrudniejszej w praktyce klinicznej do oceny, części błędniaka [37].

Badając dziewięciu chorych z jednostronnymi zaburzeniami równowagi poddanych wpływowi pola magnetycznego 7 T Ward i wsp. stwierdzili, że u chorych z niesprawnym uchem lewym wsuwanych do komory głową, ruchy gałek ocznych były skierowane ku dołowi z szarpnięciem ku górze. Jeżeli niesprawne było ucho prawe to ruchy gałek ocznych były skierowane w przeciwnym kierunku. Według autorów tego badania powyższe obserwacje mogłyby znaleźć zastosowanie w diagnostyce wybranych schorzeń ucha wewnętrznego [45].

Część badań eksperymentalnych prowadzona jest na modelach zwierzęcych. Ward i wsp. umieścili 30 zdrowych rybek akwariowych przegowanych (*danio*) w wysokim polu magnetycznym 11,7 T. Większość z nich zmieniła swój sposób pływania poruszając się szybciej, w sposób nieskoordynowany, obracając się wokół osi swojego ciała. Normalny sposób pływania rybek powrócił po usunięciu ich z pola magnetycznego. Budowa układu przedsionkowego tych rybek jest zaskakująco zbliżona do budowy błędniaka człowieka. Podobieństwo to, wg Warda i wsp. może znaleźć praktyczne zastosowanie w ocenie skutków farmakoterapii na ucho wewnętrzne [48].

Aktywacja układu przedsionkowego będąca wynikiem oddziaływania pola magnetycznego na układ równowagi może stać się uzupełnieniem stosowanych już od dawna metod pobudzania tego układu takich jak stymulacja galwaniczna (Purkyne, 1819) oraz kaloryczna (Barany, 1906). Należy pamiętać, że poza przedstawionymi powyżej możliwościami wdrożenia tej metody do działalności klinicznej ma ona swoje ograniczenia. Jednym z nich jest zmiana wzorca aktywacji centralnych dróg przedsionkowych czy wzrokowych występująca podczas fMRI [27, 49].

## Wnioski

1. Pole magnetyczne aktywuje układ przedsionkowy.
2. Trwają prace nad możliwościami wdrożenia aktywacji układu przedsionkowego zachodzącego

w polu magnetycznym do otoneurologicznej praktyki klinicznej.

3. Badania nad potencjalnie możliwymi negatywnymi skutkami oddziaływania pola magnetycznego, zwłaszcza wysokiego, na ustrój człowieka wymagają intensywnych wielopłaszczyznowych badań.

## Piśmiennictwo

1. Damadian R. Tumor detection by nuclear magnetic resonance. *Science* 1971; 171: 1151-3.
2. Theysohn JM, Kraff O, Eilers K, Andrade D, Gerwig M, Timmann D, et al. Vestibular effects of a 7 Tesla MRI examination compared to 1,5 T and 0 T in healthy volunteers. *PLoS One* 2014; 9(3): e92104.
3. OECD. OECD Health Data. 2013. OECD.
4. Seemungal BM. Neuro-otological emergencies. *Curr Opin Neurol* 2007; 20(1): 32-9.
5. Pruszyński B, Cieszanowski A. *Radiologia - diagnostyka obrazowa, Rtg, TK, USG, MR. PZWL, Warszawa* 2014.
6. ESUR Guidelines on Contrast Agents v 10.0. <http://www.esur-cm.org/index.php/> [18.08.2019].
7. EU (European Union), Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual directive within the meaning of the Article 16(1) of the Directive 89/39/EEC). 2014.
8. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. *Health Phys* 2014; 106(3): 418-25.
9. International Commission on Non-Ionizing Radiation. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 2009; 96: 505-14.
10. WHO. Environmental Health Criteria 232 static fields. 2006.
11. U.S. Department of Health and Human Services, Food and Drug Administration. Center for Devices and Radiological health, Guidance for Industry and FDA Staff, Criteria for Significant Risk Investigations of Magnetic Resonance Diagnostic Devices. Jun 20. 2014.
12. Bongers S, Slottje P, Kromhout H. Development of hypertension after long-term exposure to static magnetic fields among workers from a magnetic resonance imaging device manufacturing facility. *Environ Res* 2018; 164: 565-73.
13. Vijayalaxmi, Fatahi M, Speck O. Magnetic resonance imaging (MRI): a review of genetic damage investigations. *Mutat Res Rev Mutat Res* 2015; 764: 51-63.
14. deVocht F, van Drooge H, Engels H, Kromhout H. Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *JMRI* 2006; 23: 197-204.
15. Schaap K, de Vries CY, Mascon CK, de Vocht F, Portengen L, Kromhout H. Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5-7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms. *Occup Environ Med* 2014; 71(6): 423-9.
16. Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL. Human exposure to 4.0 Tesla magnetic fields in whole-body scanner. *Med Phys* 1992; 19(4): 1089-98.
17. Vaughan T, DelaBarre L, Snyder C, Tian J, Akgun C, Shrivastava D, et al. 9.4T human MRI preliminary results. *Mag Reson Med* 2006; 56(6): 1274-82.
18. Gowland PA. Present and future magnetic resonance sources of exposure to static fields. *Prog Biophys Med Biol* 2005; 87(2-3): 175-83.
19. Heilmair C, Theysihh JM, Maderwald S, Kraft O, Ladd ME, Ladd SC. A large-scale study on subjective perception of discomfort during 7 and 1,5 T MRI examination. *Bioelectromagnetics* 2011; 32(8): 610-19.
20. Liu F, Zhao H, Crozier S. Calculation of electric fields induced by body and head motion in high field MRI. *J Magn Reson* 2003; 161(1): 99-107.
21. Pawlak-Osińska K, Wypych A, Osiński S, Kaźmierczak H, Marzec M, Matulewski J, Serafin Z. Vestibular stimulation in humans by static magnetic fields of a 3T MRI scanner – a pilot study. *NeuroQuantology* 2019; 17(04): 21-9.
22. Schenck JF. Health and physiological effects of human exposure to whole-body four-tesla magnetic fields during MRI. *Ann NY Acad Sci* 1992; 649(1): 285-301.
23. Friebe B, Wollrab A, Thormann M, Fischbach K, Ricke J, Grueschow M, et al. Sensory perceptions of individuals exposed to the static field of 7T MRI: a controlled blinded study. *J Magn Reson Imaging* 2015; 41(6): 1675-81.
24. Gorlin A, Hoxworth JM, Mueller J. Occupational hazards of exposure to magnetic resonance imaging. *Anesthesiology* 2015; 123(4): 976-7.
25. Gorlin A, Hoxworth JM, Pavlicek W, Thunberg CA, Seamans D. Acute vertigo in an anesthesia provider during exposure to a 3T MRI scanner. *Med Devices (Auckl)* 2015; 8: 161-6.
26. Mian OS, Li Y, Antunes A, Glover PM, Day BL. On the vertigo due to static magnetic fields. *PloS One* 2013; 8(10): e78748.
27. Roberts DC, Marcelli V, Gillen JS, Carey JP, Della Santina CC, Zee DS. MRI magnetic field stimulates rotational sensors of the brain. *Curr Biol* 2011; 21(19): 1635-40.
28. St George RJ, Day BL, Fitzpatrick RC. Adaptation of vestibular signals for self-motion perception. *J Physiol* 2011; 589: 843-53.
29. Heinrich A, Szostek A, Meyer P, Reinhard I, Gilles M, Paslakis G, et al. Women are more strongly affected by dizziness in static magnetic fields of magnetic resonance imaging scanners. *Neuroreport* 2014; 25(14): 1081-4.



30. Cason AM, Kwon B, Smith K, Houpt TA. Labyrinthectomy abolishes the behavioral and neural response of rats to a high-strength static magnetic field. *Physiol Behav* 2009; 97(1): 36-43.
31. Houpt TA, Carrel L, Gonzales D, Janovitz B, Mueller A, Mueller K, et al. Behavioral effects on rats of motion within a high static magnetic field. *Physiol Behav* 2011; 102(3-4): 338-46.
32. Houpt TA, Pittman DW, Barranco JM, Brooks EH, Smith JC. Behavioral effects of high – strength static magnetic fields on rats. *J Neurosci* 2003; 23(4): 1498-505.
33. Ward BK, Swarthout L, Zee DS, Carey JP, Della Santina CC. Magnetic field-induced eye movements in mice. *ARO Proceedings* 2013 abstract.
34. Patel M et al. Pilot study investigating the effect of the static magnetic field from a 9.4T MRI on the vestibular system. *J Occup Environ Med* 2008; 50: 576-583.
35. Marcelli V, Esposito F, Aragi A, Furia T, Riccardi P, Tosetti M, et al. Spatio-temporal pattern of vestibular information processing after brief caloric stimulation. *Eur J Radiol* 2009; 70: 312-16.
36. Heinrich A, Szostek A, Meyer P, Nees F, Rauschenberg J, Gröbner J, et al. Cognition and sensation in very high static magnetic fields: a randomized case-crossover study with different field strengths. *Radiology* 2013; 266(1): 236-45.
37. Mian OS, Li Y, Antunes A, Glover PM, Day BL. Effect of head pitch and roll orientations on magnetically induced vertigo. *J Physiol* 2016; 594(4): 1051-67.
38. Ward B, Zee D. Dizziness and vertigo during MRI. *N Engl J Med* 2016, 375(21) e44.
39. O’Leary DP, Vilches-Troya J, Dunn RF, Campos-Munõz O. Magnets in guitarfish vestibular receptors. *Experientia* 1981; 37(1): 86-8.
40. Vilches-Troya J, Dunn RF, O’Leary DP. Relationship of the vestibular hair cells to magnetic particles in the otolith of the guitarfish sacculus. *J Comp Neurol* 1984; 226: 489-94.
41. Glover PM, Cavin J, Qian W, Bowtell R, Gawland PA. Magnetic-field- induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics* 2007; 28(5): 349-61.
42. Antunes A, Glover PM, Li Y, Mian OS, Day BL. Magnetic field effects on the vestibular system: calculation of the pressure on the cupula due to ionic current-induced Lorentz force. *Phys Med Biol* 2012; 57(14): 4477-87.
43. Oman CM, Young LR. The physiological range of pressure difference and cupula deflections in human semicircular canal: theoretical considerations. *Acta Otolaryngol* 1972; 74(5): 324-31.
44. Glover PM, Li Y, Antunes A, Mian OS, Day BL. A dynamic model of the eye nystagmus response to high magnetic field. *Phys Med Biol* 2014; 59(3): 631-45.
45. Ward BK, Tan GX, Roberts DC, Della Santina CC, Zee DS, Carey JP. Strong static magnetic fields elicit swimming behaviors consistent with direct vestibular stimulation in adult zebrafish *PLoS One* 2014; 9 (3): e92109.
46. Ward B, Lee YH, Roberts DC, Naylor E, Migliaccio AA, Della Santina CC. Mouse magnetic-field nystagmus in strong static magnetic fields is dependent on the presence of Nox3. *Otol Neurotol* 2018; 39: e1150-e1159.
47. Shaikh AF. A trail of artificial vestibular stimulation electricity, heat and magnet. *J Neurophysiol* 2012; 108(1): 1-4.
48. Ward BK, Tan GX, Roberts DC, Della Santina CC, Zee DS, Carey JP. Strong static magnetic fields elicit swimming behaviors consistent with direct vestibular stimulation in adult zebrafish *PLoS One* 2014; 9 (3): e92109.
49. Straumann D, Sockisch CJ. Neurophysiology: vertigo in MRI machines. *Curr Biol* 2011; 21(19): R806.