

Charakterystyka własności fizycznych pola magnetycznego niskiej częstotliwości w biologicznym oddziaływaniu na organizmy żywe

The characteristic of physical properties of low magnetic field in biological influence on living organisms

z Katedry Fizjologii Doświadczalnej i Klinicznej Zakładu Fizjologii Krążenia, Uniwersytet Medyczny w Łodzi
Kierownik Katedry: prof. dr hab. n. med. Dariusz Nowak

Streszczenie

Pole magnetyczne warunkuje przebieg wielu procesów życiowych organizmów żywych. Stosowane jest ono w terapii jako magnetoterapia. Efekty terapeutyczne uwarunkowane są biologicznym oddziaływaniem pola magnetycznego, a wynika ono z własności fizycznych tego pola. Zjawiska magnetyczne występujące w tkankach wynikają z oddziaływania siły Lorentza, indukowania efektu Halla oraz indukowania zmiennego napięcia w strukturach organizmów żywych.

Słowa kluczowe: [pole magnetyczne niskiej częstotliwości](#), [własności fizyczne](#).

Key words: [low frequency magnetic field](#), [physical properties](#).

WSTĘP

Naturalne pola magnetyczne występują we wszechświecie od jego początków. Przenikały one wszechświat na długo wcześniej zanim pojawiły się rośliny, zwierzęta i człowiek, odegrały wielką rolę w procesie powstawania pierwszych form życia. Wszystkie żywe istoty podlegają wpływom pola magnetycznego, a zachodzące w nich procesy wynikają z działania sił elektromagnetycznych (1). Natężenie pola geomagnetycznego kształtuje się w granicach od 20 do 70 μT . Zmiany natężenia i kierunku linii sił działania pola magnetycznego ziemi u zwierząt posiadających magnetoreceptory determinują orientację przestrzenną w polu magnetycznym. Najnowsze badania donoszą, że prawdopodobnie w mózgu człowiekkształtnych również znajdują się mikroskopijne receptory zawierające fragmenty minerału magnetytu (1-5).

Nazwa magnetyzm wywodzi się od nazwy okolicy – Magnesia, w której wydobywany był kamień zawierający związek Fe_3O_4 . Pierwsze doniesienia na temat leczniczego działania magnetytu pochodzą z czasów starożytnych – eksperymenty z wykorzystaniem magnesów prowadzono już w starożytnych Chinach. Korzystny wpływ pola magnetycznego na organizm ludzki obserwował również Hipokrates (460 r.p.n.e.), Galen (IX wiek), Avicenna (X wiek), oraz Paracelsus (XVI wiek) (6-7).

W XVIII wieku miały miejsce odkrycia dotyczące magnetyzmu i elektryczności sformułowane jako podstawowe prawa fizyki Oersteda (1820 r.), Faradaya (1831 r.), Maxwella (1865 r.) (6, 8-9). Odkrycia te stały się podstawą do prowadzenia badań dotyczących oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe.

Postęp w nauce i w technice, charakterystyczny dla współczesnego świata, sprawił iż szczególnie intensywnie następuje rozwój jednej z dyscyplin lekarskich jaką jest medycyna fizykalna. Dziedzina ta wykorzystuje różne postacie energii fizycznej, w tym również energii pola magnetycznego.

Medycyna fizykalna wywodzi się od przyrodolecznictwa, stosowanego od najdawniejszych czasów. Oparta jest na wykorzystywaniu różnych form energii występujących w naturalnym środowisku człowieka lub też wytwarzanej przez specjalnie skonstruowaną aparaturę, w celu pobudzenia i usprawniania fizjologicznych mechanizmów samoobrony i zdrowia organizmu (10).

Celem medycyny fizykalnej jest więc usunięcie procesów chorobowych lub ich skutków, zapobieganie postępowi choroby, zmniejszenie lub usuwanie dolegliwości, usprawnienie funkcji poszczególnych układów i narządów, poprawa lub utrzymanie wydolności ogólnej organizmu.

We współczesnej medycynie stosuje się leczenie różnorodnymi formami fizykalnymi jako uzupełnienie farmakoterapii lub leczenia chirurgicznego (10).

Z uwagi na rodzaj stosowanej formy energii medycyna fizykalna obejmuje szereg działów, takich jak: kinezyterapię i masaż leczniczy, elektroterapię, termoterapię, fototerapię, aerozoloterapię, klimatoterapię, balneoterapię oraz coraz powszechniej stosowaną magnetoterapię (7, 10-12).

Magnetoterapia jest formą terapeutyczną wykorzystującą zmienne pole magnetyczne niskiej częstotliwości o częstotliwość do 100 Hz, indukcji pola do 30 mT i różnym kształcie impulsu pola: prostokątnym, trójkątnym, sinusoidalnym w wersji bipolarnej i unipolarnej (10-13).

Zmienne pole magnetyczne stosowane jest w terapii od ponad 20 lat. Pierwsze doniesienia o terapeutycznym wykorzystaniu pola magnetycznego niskiej częstotliwości datują się od około 1973 roku i dotyczą zastosowania tej formy energii w celu przyspieszenia procesu zrastania kości oraz w leczeniu pacjentów z brakiem zrostu kostnego (14-19). Pod wpływem pola magnetycznego następuje regulacja syntezy proteoglikanów i kolagenu w tkance chrzęstnej. Buczek (20) zaobserwował przyspieszenie przebudowy tkanki kostnej grubowłóknistej w tkankę kostną blaszkowatą. Cechą charakterystyczną przebudowującej się tkanki kostnej jest zwiększona angiogeneza. W doświadczeniu tym zastosowano pole magnetyczne o częstotliwości 20 Hz i indukcji 10 mT. Magnetoterapia znajduje zastosowanie również w leczeniu zmian troficznych, owrzodzeń podudzi o różnej etiologii, oraz ran i odleżyn. W badaniach tych zaobserwowano stymulację procesu ziarninowania i naskórkowania, a także działanie antyseptyczne i analgetyczne. Korzystne efekty leczenia tych jednostek chorobowych uzyskane zostały z zastosowaniem pól magnetycznych o częstotliwości od 5 do 40 Hz i indukcji 4,5 - 8,4 mT (21-24).

Do klasycznych wskazań zastosowania magnetoterapii należą natomiast zespoły bólowe różnego pochodzenia. Od kilku lat liczne prace wskazują na skuteczność działania pól magnetycznych w terapii migreny, bólów głowy, zespołów bólowych narządu ruchu w przebiegu zmian zwyrodnieniowych stawów i kręgosłupa (25-27). Uzyskanie efektu analgetycznego autorzy tłumaczą udziałem układu opioidowego, jak również udziałem miejscowych czynników, które zmieniając przepuszczalność błon komórkowych, hiperpolaryzują zakończenia nerwowe, modyfikując w ten sposób przewodnictwo nerwowe (25, 28-29).

Literatura donosi również o korzystnych efektach stosowania magnetoterapii w rehabilitacji chorych w schorzeniach neurologicznych, w terapii chorych pulmonologicznych, w stanach zapalnych i pourazowych narządu ruchu (30-34).

Do najczęściej opisywanych przeciwwskazań wymienianych w literaturze należą: ciąża, choroba nowotworowa, czynna gruźlica płuc, cukrzyca młodzieńcza, krwawienia z przewodu pokarmowego, ciężkie infekcje pochodzenia wirusowego, bakteryjnego i grzybiczego, obecność elektronicznych implantów (11).

Dotychczasowe badania dotyczące leczenia magnetoterapią nie są jednoznaczne. Riva i wsp. (35) podkreślają brak skutków ubocznych w czasie magnetoterapii, jednak badania o charakterze epidemiologicznym donoszą o szkodliwym oddziaływaniu pól elektromagnetycznych na organizm człowieka. Doniesienia te jednak nie są jednoznaczne co do charakteru skutków zdrowotnych (36-38).

Magnetoterapia jest stosunkowo młodą dyscypliną medycyny, a powszechność stosowania magnetoterapii w procesie leczniczym i profilaktyce skłania do kontynuacji badań doświadczalnych i przedklinicznych, które stanowiąc będą wyjaśnienie obserwowanych efektów terapeutycznych, oraz umożliwią poznanie mechanizmów oddziaływania pola magnetycznego na organizmy żywe. Prowadzenie badań doświadczalnych i klinicznych dotyczących zarówno korzystnych jak i negatywnych oddziaływań tej formy energii przyczyni się do bezpiecznego jej stosowania w leczeniu.

WŁASNOŚCI FIZYCZNE POLA MAGNETYCZNEGO NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Podstawę reakcji zachodzących w tkankach pod wpływem zmiennego pola magnetycznego stanowią jego właściwości fizyczne. Każdy atom charakteryzuje się pewną wielkością magnetyczną zwaną momentem magnetycznym. W wyniku oddziaływania z polem magnetycznym wszystkie ciała możemy podzielić na diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki. Ferromagnetyki są to ukształtowane w określonej strukturze krystalicznej atomy paramagnetyka (w tzw. domenach). Para i ferromagnetyki skupiają linie sił pola magnetycznego, natomiast diamagnetyki rozpraszają linie sił pola magnetycznego (9, 39). Na cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym zewnętrzne pole magnetyczne oddziałuje z siłą Lorentza, która określona jest zależnością:

$$F = q (v \times B) \quad (1)$$

gdzie:

q – ładunek elektryczny

v – prędkość

B – indukcja magnetyczna.

Gdy cząstka ta porusza się po okręgu – po torze kołowym – kierunek siły Lorentza oraz kierunek wywołanego przez nią w polu magnetycznym odchylenia zależy od znaku ładunku. Gdy cząstka porusza się równoległe do linii sił pola wówczas siła Lorentza równa się zeru i cząstka nie ulega odchyleniu, a w przypadku gdy cząstka uczestniczy w dwóch ruchach jednocześnie: po okręgu oraz przemieszcza się ruchem postępowym w kierunku prostopadłym do płaszczyzny obiegu, to torem ruchu naładowanej cząstki jest linia śrubowa, której oś pokrywa się z linią indukcji pola magnetycznego.

Występowanie siły Lorentza wywołującej ruch cząstek naładowanych powoduje, że w stałym polu magnetycznym jony gromadzą się w obrębie błon biologicznych, a w zmiennym polu magnetycznym jony oscylują i wpływają na procesy dyfuzji. Efektem działania tej siły jest zmiana rozmieszczenia jonów, ich dystrybucja w środowisku zewnątrz- i wewnątrzkomórkowym, co może mieć wpływ na zmiany w potencjale błonowym (6, 41). Wynikiem działania siły Lorentza na ładunki elektryczne

biorące udział w uporządkowanym ruchu jest efekt Halla, a powstająca poprzeczna różnica potencjałów nosi nazwę napięcia Halla. Występowanie efektu Halla może spowodować zmianę ruchu jonów w elektrolicie, wpływając na zmianę agregacji cząstek chemicznych, a tym samym może prowadzić również do zaburzenia w przepływie informacji mającej trafić do efektora. Efektem tych zjawisk będą zmiany reakcji poszczególnych organów odbierających ładunki elektryczne jako źródło informacji (6, 9).

Każde zmieniające się pole magnetyczne indukuje w elektrolitycznych strukturach organizmu zmienne napięcie, a siła elektromotoryczna powstająca w danym obwodzie, zgodnie z prawem Faradaya, jest równa:

$$E = \dot{\int} (2)$$

gdzie: s – powierzchnia,

B – indukcja,

t – czas

natomiast gęstość generowanego w tkance prądu, w zależności od częstotliwości i indukcji magnetycznej, będzie wynosić:

$$J = \eta f B (3)$$

gdzie: η – współczynnik uwzględniający przewodność i geometrię tkanki.

f – częstotliwość

Zjawisko indukowania zmiennego napięcia pod wpływem zmieniającego się pola magnetycznego obserwowane jest w szczególności w obrębie błon biologicznych i w obrębie układów przewodzących, takich jak: układ naczyniowy, układ nerwowy, układ limfatyczny. Zaindukowany zmienny prąd, który zależny jest od częstotliwości zmian pola (wzór 3) oraz indukcji magnetycznej, może stanowić również przyczynę występowania tarcia wewnętrznego w elektrolitycznych strukturach organizmów żywych (6, 42).

Pole magnetyczne wpływa na stan spinowy jonów pierwiastków paramagnetycznych i wolnych rodników oraz molekuly diamagnetyczne. Efekt nakładania się zewnętrznego pola magnetycznego na nieskompensowane spiny jonów pierwiastków magnetycznych powoduje podwyższenie momentu magnetycznego tych pierwiastków i tym samym oddziałuje na funkcję molekuł biologicznych, w skład których one wchodzi, prowadząc do uaktywnienia reakcji enzymatycznych. Istnieje jednak zarówno dolny jak i górny próg natężenia pola magnetycznego, w których następuje zmiana aktywności enzymów. Poniżej dolnej granicy nie obserwuje się żadnych reakcji ze strony enzymów, natomiast powyżej górnego progu dochodzi do gwałtownego spadku aktywności enzymatycznej. Granice natężenia pól dla poszczególnych enzymów nie są jednakowe (43).

Wielkości fizyczne, które charakteryzują pole magnetyczne, a stosowane są w magnetoterapii to :

- natężenie pola magnetycznego H , którego jednostką w układzie SI jest [A/m].

- indukcja magnetyczna B , której jednostką jest tesla [T] zależność między indukcją, a natężeniem pola magnetycznego określa wzór:

$$B = \mu \mu_0 H (4)$$

gdzie: $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ N/A jest przenikalnością magnetyczną próżni, μ jest względną przenikalnością magnetyczną substancji

- oraz częstotliwość f wyrażana w Hz, określająca liczbę zmian amplitudy pola magnetycznego w ciągu sekundy (6, 9, 44).

Z teorii elektromagnetyzmu wynika, iż zmiennym w czasie polem magnetycznym towarzyszą zawsze pola elektryczne (teoria Maxwella), (9) i wystarczy istnienie jednego z nich, aby powstało pole elektromagnetyczne. Zmieniające się w czasie pola elektryczne i magnetyczne powodują wystąpienie zjawiska wzajemnej indukcji tych pól. Obszary wzajemnych indukcji przemieszczają się w przestrzeni tworząc falę elektromagnetyczną, która w próżni rozchodzi się z prędkością 300 000 km/s, a w ośrodkach materialnych prędkość ta jest mniejsza na skutek oddziaływania składowej elektrycznej i magnetycznej fali z dipolami elektrycznymi i momentami magnetycznymi ośrodka.

Wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne to:

- natężenie pola elektrycznego (E),
- natężenie pola magnetycznego (H),
- częstotliwość (f),
- prędkość rozchodzenia się zmian pola (v).

W zależności od wartości tych parametrów możemy mówić o zmiennym polu elektrycznym, gdy natężenie tego pola znacznie przekracza wartości natężenia pola ziemskiego (130 V/m), a natężenie pola magnetycznego jest porównywalne z polem ziemskim (30-70 μ T), natomiast zmienne pole magnetyczne występuje wówczas, gdy wartość natężenia pola elektrycznego jest porównywalna z polem ziemskim, a natężenie pola magnetycznego ma wartości przekraczające wartości pola ziemskiego (11).

W podziale metrycznym widma elektromagnetycznego pole magnetyczne stosowane w magnetoterapii określane jest jako częstotliwości ekstremalnie niskie ELF (częstotliwość do 300 Hz), a w literaturze anglosaskiej ELF –MF, czyli *extremely low frequency magnetic field* (11, 45).

Oddziaływanie pól elektromagnetycznych z obiektami biologicznymi uwarunkowane jest ich częstotliwością. Przyjmuje się, iż w zakresie częstotliwości poniżej 100 kHz są to efekty biologiczne – stymulacyjne, natomiast przy częstotliwościach powyżej 100 kHz następuje ogrzewanie tkanek – efekt termiczny – wskutek pochłaniania energii [45].

Praca finansowana z działalności statutowej nr 503-179-1.

Piśmiennictwo

1. Chown M.: Wielki wybuch. W: Współczesna nauka bez tajemnic Fifield R., (red.) Wydawnictwo Zysk, Poznań, 2000:13-24.
2. Bamberger S., Valet G., Storch F.: Ruhenstron-Bauer G.: Electromagnetically induced streaming as a mechanism of the biomagnetic orientation of organisms. Z. Naturforsch. C. 1978; 33C,1/2: 159.
3. Hong F.T.: Magnetic field effects on biomolecules, cells and living organisms. Biosystems. 1995; 36(3) :187-229.
4. Ritz T., Adem S., Schulten K.: A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. Biophys J. 2000;78(2):707-18.
5. Baker R.R., Mather I.G., Kennaugh I.H.: Magnetic bones in human sinuses. Nature. 1983; 301: 79-83.
6. Dunajski Z.: Biomagnetyzm. Wydawnictwo Komunikacji łączności, Warszawa, 1990.
7. Basford J.R.: A historical perspective of the popular use of electric and magnetic therapy. Arch Phys Med. Rehabil. 2001; 82(9): 1261-9.
8. Presman A.S.: Pola elektromagnetyczne a żywa przyroda. PWN, Warszawa, 1971.
9. Zahn M.: Pole elektromagnetyczne. PWN, Warszawa, 1989.
10. Mika T.: Fizykoterapia. PZWL, Warszawa, 1993.
11. Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. α -medica press, Bielsko-Biała, 2000.
12. Straburzyńska-Lupa A., Straburzyński G.: Fizjoterapia. PZWL, Warszawa, 2002.
13. Drzazga Z., Sieroń A., Liszka G., Wójcik J.: Pola magnetyczne stosowane w magnetoterapii. Balneologia Polska, 1997; XXXIX (3-4): 79-94.
14. Bassett C.A.: Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields (PEMFs). Crit. Rev. Biomed. Eng., 1989; 17(5): 451-529.

15. Tager K.H.: The use of electrodynamic alternating potential in operative and conservative orthopedics. *MMW Munch Med Wochenschr.* 1975; 117(19): 791-8.
16. Bassett C.A., Mitchell S.N., Gaston S.R.: Treatment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 1981; 63(4): 511-23.
17. Bassett C.A., Mitchell S.N., Gaston S.R.: Pulsing electromagnetic field treatment in ununited fractures and failed arthrodeses. *JAMA.* 1982; 257(5): 623-8.
18. Bassett C.A., Mitchell S.N., Schink M.M.: Treatment of therapeutically resistant non-unions with bone grafts and pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg. Am.*, 1982; 64(8): 1214-2.
19. Aaron R.A., Ciombor D.M., Simon B.J.: Treatment of nonunions with electric and electromagnetic fields. *Clin. Orthop.*, 2004; 419: 21-9.
20. Buczek E.: Wpływ zmiennego pola magnetycznego o niskiej częstotliwości na proces powstania blizny kostnej. *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja.* 2000; 3: 83-5.
21. Aleksenko A.V.: Treatment of Trophic ulcers of the lower extremities using a magnetic field. *Klin. Khir.* 1991; (7): 60-3.
22. Sieroń A., Żmudziński J., Cieślak G., i in.: Leczenie owrzodzeń podudzi za pomocą zmiennego pola magnetycznego. *Przegl. Dermatol.* 1991; LXXVIII(3): 196-200.
23. Sieroń A., Glinka M.: Wpływ niskozmiennych pól magnetycznych na proces gojenia się ran. *Balneologia Polska.* 1999; XLI(1-2): 75-81.
24. Alekseenko A.V., Gusak V.V., Tarabanchuk V.V., et al: Magnetic therapy in treatment of patients with leg ulcers. *Khirurgiia.* 1998; (7): 14-6.
25. Sieroń A., Biniszkiwicz T., Sieroń K., i in.: Subiektywna ocena leczniczych słabych pól magnetycznych. *Acta Bio-Optica et Informatica.* 1998; 4: 133-137.
26. Trochimiak L., Czernicki J., Woldańska-Okońska M., i in.: Pole magnetyczne w leczeniu zespołów bólowych kręgosłupa. *Balneologia Polska.* 1997; XXXIX(3-4): 107-111.
27. Sadlonova J., Korpas J.: Personal experience in the use of magnetotherapy in diseases of the musculoskeletal system. 1999; 100(12): 678-81.
28. Cieślak G., Morawiec J., Sieroń A., i in.: Zmiana reaktywności szczurów na termiczny bodziec bólowy pod wpływem zmiennego pola magnetycznego. *Balneologia Polska.* 1994; XXXVI(3-4): 24-8.
29. Prato F.S., Carson J.J., Ossenkopp K.P., et al.: Possible mechanisms by which extremely low frequency magnetic fields affect opioid function. *Faseb. J.* 1995; 9(9): 807-814.
30. Woldańska-Okońska M., Czernicki J.: Pole magnetyczne w rehabilitacji chorych po udarach mózgu. *Balneologia Polska.* 1997; XXXIX(2-4): 112-117.
31. Wróbel P., Trabka R.: Zastosowanie impulsowego pola magnetycznego niskiej częstotliwości u pacjentów po artroskopowym usunięciu łąkotki przysrodkowej. *Fizjoterapia Polska.* 2003; 3(1): 31-7.
32. Sadlonova J., Korpas J., Vrabec M., et al.: The effect of the pulsatile electromagnetic field in patients suffering from chronic obstructive pulmonary disease and bronchial asthma. *Bratisl Lek Listy.* 2002; 103(7-8): 260-5.
33. Quttan M., Schhfiend O., Wiesinger G.F., et al.: Clinical effectiveness of magnetic field therapy - a review of the literature. 2000; 27(3): 61-8.
34. Kula B., Drózdź M., Sobczak A.: Biologiczne skutki działania pól magnetycznych na organizmy żywe. *Ann. Acad. Med. Siles.*, 1997; 32: 93-110.
35. Riva Sanseverino E., Vannini A., Castellacci P.: Therapeutic effects of pulsed magnetic fields on joint diseases. *Panminerva Med.* 1992; 34(4): 187-96.
36. Repacholin M.H., Greenebaum B.: Interaction of static and extremely low electric and magnetic fields with living systems: health and research needs. *Bioelectromagnetics.* 1999; 20(3): 133-60.
37. Hardell L., Holmberg B., Maler H., et al: Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and the risk of malignant diseases - an evaluation of epidemiological and experimental findings. *Eur J. cancer Prev.* 1995; 4 Suppl 1: 3-107.
38. Tenforde T.S.: Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Annu. Rev. Public. Health.*, 1992; 13: 173-96.
39. Jaroszyk F.: *Biofizyka.* PZWL Warszawa, 2000.
40. Sieroń A.: Synteza i wydzielanie kwasów żółciowych u szczurów poddanych działaniu wolnozmiennych pól magnetycznych. *Zabrze*, 1995: 28-29. Rozprawa habilitacyjna.
41. Godyak V.A., Alexandrovich B.M., Kolobov V.I.: Lorentz force effects on the electron energy distribution in inductively coupled plasmas. *Phys. Rev. E. Stat. Nonlin. Soft Matter. Phys.*, 2001; 64(2): 026406.
42. Zmysłony M.: Działanie stałych i sieciowych pól magnetycznych występujących w środowisku człowieka na układy biologiczne. Mechanizm rodnikowy. Instytut Medycyny Pracy im. Prof. J. Nofera, Łódź, 2002, praca habilitacyjna.
43. Wadas R.: *Bomagnetyzm.* PWN, Warszawa, 1978.
44. Mikołajczyk H.: *Pola elektromagnetyczne.* PWN, Warszawa, 1974.
45. Aniołczyk H.: *Pola elektromagnetyczne. Źródła – oddziaływanie – ochrona.* Instytut Medycyny Pracy im. Prof. J. Nofera, Łódź, 2000.

otrzymano: 2006-03-10

zaakceptowano do druku: 2006-04-19

Adres do korespondencji:

*Elżbieta Ciejka

ul. Zamenhofska 17 m 13, 90-510 Łódź

tel. (0 42) 637 11 37, tel kom. 0-608-436-114

e-mail: elzbieta@interia.pl