

# MAGNETYZM W SŁUŻBIE ORGANIZMÓW ŻYWYCH

WÓJCIK MARIUSZ

AGH, WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I CERAMIKI,  
AL. MICKIEWICZA 30,; 30-059 KRAKÓW, POLSKA

## Streszczenie

*W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące wykorzystania zjawiska magnetyzmu w medycynie pokazując krótko rys historyczny i aktualne możliwości diagnostyczne nowoczesnej aparatury badawczej. Przybliżono czytelnikowi jedno z najbardziej fascynujących zastosowań magnetyzmu jakim jest stymulacja magnetyczna ludzkiego mózgu. Do przyszłościowych celów tych eksperymentów należy niewątpliwie lepsze poznanie zarówno funkcjonowania ludzkiego mózgu jak i odkrycie możliwości niesienia pomocy pacjentom chorym na chorobę Alzheimera, Parkinsona czy raka mózgu.*

**Słowa kluczowe:** magnetyzm, magnetyt  
[Inżynieria Biomateriałów, 38-43, (2004), 181-187]

Magnetyzm i magnetyt odgrywają znaczącą rolę zarówno w medycynie jak i w różnych dziedzinach badań naukowych i dlatego celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wybranych informacji, które mogą zainteresować specjalistów poszukujących piśmiennictwa dotyczących zastosowań magnetyzmu i magnetytu w medycynie.

Efekt magnetytowy obserwowany od tysiącleci jako "zorza polarna" na północnej półkuli i olbrzymi potencjał magnetyzmu w jego możliwościach w zastosowaniach medycznych był przedmiotem nadziei, badań, spekulacji a nawet szarlatanizmu.

W różnych odkryciach naukowych w minionych latach znajdowano minerał magnetyt wytworzony przez organizmy żywe. Stwierdzono jego obecność w prymitywnych morskich mięczakach, w chitynowcach, w pszczołach, w magneto-taktycznych bakteriach, domowych gołębiach i delfinach [1]. Znaczenie biologiczne magnetytu związane jest głównie z jego właściwościami fizycznymi, ponieważ jest to najcięższy, najtrwalszy, najbardziej przewodzący elektrycznie i zarazem jedyny ferromagnetyczny minerał jaki kiedykolwiek odkryto, który bezpośrednio mogą wytwarzać organizmy żywe. Jednakże, pomimo tych wyrafinowanych właściwości, biologiczną funkcję magnetytu wyjaśniono tylko w przypadku chitynowców i bakterii, ponieważ chitynowce używają magnetytu do budowy zębów, natomiast bakteriom służy on do orientacji w ziemskim polu magnetycznym. Poza tym, zdolności domowych gołębi i pszczoł w wykrywaniu bardzo słabych zmian ziemskiego pola magnetycznego może tłumaczyć występowanie w żywych organizmach specjalnych czujników opartych na magnetycie. Naukowcy często wykrywali słabe ale powtarzalne pozostałości magnetyzmu jednorodnie rozłożone wewnątrz tkanek kręgowców. Przykładem są mięśnie szyjne gołębi, boczna linia narządów rekinów, mózdzek, część środkowa mózgu i stwardniała skóra rebusów. Nie spotkano ich natomiast w ludzkim rdzeniu mózgowym i gruczołach wytwarzających adrenalinę. Pomimo tego, że do tej pory jeszcze nie znaleziono źródła pozostałości magnetycznej w tych tkankach, to właściwości magnetyczne są związane z obecnością od 1 do 10 milionów pojedynczych domen krystalicznego magnetytu na jeden gram tkanki [2].

# MAGNETISM IN SERVICE WITH LIVING ORGANISMS

181

WÓJCIK MARIUSZ

AGH-UST, FACULTY OF MATERIALS SCIENCE AND CERAMICS,  
AL. MICKIEWICZA 30: 30-059 CRACOW, POLAND

## Abstract

*Some problems of an application of magnetism in medicine with brief historical aspect and modern diagnosis possibilities on clinical instruments were shown. Approaches have been done for one most fascinating possible application of magnetism in magnetic stimulation of the human brain. It has been ascertained that future purposes of these experiments with the recognition of the differences of the neural excitation level in brain could be helpful in medicine diagnosis in the case of often-met civilised Alzheimer as well as brain tumour disease.*

**Key words:** Magnetism, Magnetite  
[Engineering of Biomaterials, 38-43, (2004), 181-187]

Magnetism and magnetite plays an eminent role in a medicine and in a number of research fields, and the aim of this paper is to deliver some informations to an interested specialist seeking material concerning the application of magnetism and magnetite in medicine.

Magnetite effects such as the "northern lights" in the Northern Hemisphere have been observed for thousands of years and the potential of magnetism for medical application has been the object of hope, investigations, speculation, and even charlatanism. During many years in the past, a variety of living organisms have been found to precipitate biologically the ferromagnetic mineral magnetite. Magnetite has been identified in a primitive marine mollusc, the chiton, in honeybees, magnetotactic bacteria, homing pigeons and dolphins [1]. Magnetite is of biological interest because it is the densest, hardest, most electrically conductive and only ferromagnetic mineral that has yet been found as a direct precipitate in living organisms. Despite these sophisticated properties, however, the biological function of magnetite has only been clearly established in chiton and bacteria because chiton use it in their teeth and bacteria use it to provide orientation in the geomagnetic field. Beyond this, the ability of homing pigeons and honeybees to detect minute geomagnetic fluctuations can explain the magnetite-based sensory existing in living organisms. Scientists have often found a weak but reproducible ferromagnetic remanence present in and uniformly distributed through many vertebrate tissues. Example of this are pigeon neck muscles, the lateral line organs of sharks, the cerebellum, midbrain and corpus callosum of rhesus monkeys but not in the cerebral cortex and human adrenal glands. While there is not yet identified the source of the remanence in these tissue, but the magnetic properties are consistent with the presence of 1-10 million single-domain magnetite crystals per gram [2].

Historically, Petrus Peregrinus did the first treatise on magnetised needles and their properties in 1269 [3]. This treatise clearly documented a number of magnetic properties including that magnetic forces act at a distance, magnetic forces attracts only magnetic materials, like poles repel and unlike poles attract and north poles point north and south poles south. Equipped with this knowledge, the medieval

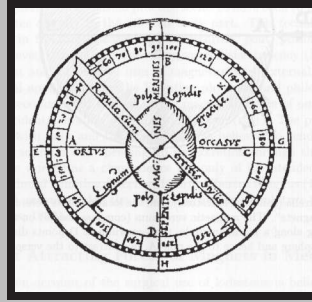
Historycznie rzecz biorąc, pierwszą rozprawę naukową poświęconą magnetycznym igłom i ich właściwościom napisał Petrus Peregrinus w 1269 roku [3]. W swojej rozprawie jasno udokumentował liczne właściwości magnetyczne takie jak siła oddziaływania magnetytu w funkcji odległości, zdolności przyciągania tylko materiałów magnetycznych, udowodnienia, że podobne pola wzajemnie się odpychają, a przeciwne przyciągają oraz, że biegun północny wskazuje północ, a południowy południe. Należy przypuszczać, że średniowieczni Europejczycy posiadający taką właśnie wiedzę mogli podróżować po świecie i odkrywać różne kraje (RYS. 1).

William Gilbert, osobisty lekarz królowej Anglii Elżbiety I, po przeprowadzeniu bardzo wielu eksperymentów w roku 1600 udokumentowanych książką zatytułowaną "Magnetyt", w której dokonał także podsumowania stanu wiedzy na temat magnetyzmu i elektryczności, stwierdził, że ziemia sama w sobie jest magnezem [4].

Pierwsze znane medyczne zastosowanie magnezu należy przypisać Talesowi z Miletu (ok. 624-547 BC), który jako pierwszy skojarzył człowieka z tym minerałem. Wierzył, że dusza w jakiś sposób wytwarza ruch, a skoro magnez porusza żelazo, to także wytwarza ruch, a zatem musi posiadać duszę. Wiara ta spowodowała, że wiele cudownych uzdrowień zostało przypisanych magnetytowi. W piśmiennictwie medycznym tamtych czasów można znaleźć zapisy o tym, że Hipokrates z Kos (ok. 460-360 BC) stosował jałowe tlenki żelaza w postaci magnetytu czy hematytu do tamowania spuszczanej w celach leczniczych krwi oraz do kontroli krwotoku.

W pierwszym wieku naszej ery, rzymski nauczyciel, Pliny z Elderu (23-79 AD) zgromadził i opisał całą wiedzę swoich czasów w formie encyklopedii, z której korzystano przez następne 1700 lat. Napisał był wiele o tym, że chociaż w większości starożytni używali magnetytu do zewnętrznych zastosowań medycznych, to Egipcki lekarz Avicenna promował użycie magnetytu wewnętrznie jako antidotum dla przypadkowego połknięcia trującej rdzy zbożowej. W przypadkach obrzęku zalecano picie mieszaniny magnetytu z mlekiem [5]. Z innych medycznych zastosowań magnezu można wymienić usuwanie opilków żelaza z oka dzięki istnieniu sił przyciągających magnezu. Magnetyt był także zalecany w chorobach układu nerwowego i hipnozie. Mesmer, hipnotyzując wykazujących symptomy hysterii pacjentów za pomocą magnetytu osiągnął wiele wyglądających na cuda uzdrowień [6].

W ostatnich 20 latach, medyczne zastosowanie magnetyzmu i magnezu znacznie się poszerzyło i objęło różne obszary, do których należy między innymi zaliczyć kardiologię, neurochirurgię, onkologię, radiologię czy dentystrykę. Nowe zastosowania były możliwe dzięki rozwojowi i miniaturyzacji elektromagnesów, rozwojowi nadprzewodzących elektromagnesów i wprowadzeniem silnych stałych magnesów wytwarzanych ze stopów Sm-Co i Nd-Fe-B [7]. Materiały te umożliwiły skonstruowanie miniaturowych magnesów i cewek elektromagnetycznych, które były tak małe, że można je było wprowadzać do końcówek cewników naczyń krwionośnych. Tak małe cewniki pozwalały na kontrolowanie wnętrza naczyń krwionośnych z zewnątrz ciała pacjenta stosując silne pola magnetyczne i były stosowane klinicznie zarówno w celu monitorowania wewnętrznych prądów w postaci elektroencefalografów jak i wytwarzania elektrycznych zakrzepów w przypadkach nie operowalnych tętniaków tętnic. Tak wyrafinowana technika mogła być także z powodzeniem stosowana w diagnostyce chorób serca u małych dzieci gdy odpowiednio umiejscowiony magnez umożliwiał bezpośrednie wprowadzenie końcówki cewnika do prawej komory serca w celu podania czynnika kontra-



**RYS. 1. Owalny magnetyt odkryty przez Petrusa Peregrinusa umieszczony wewnątrz drewnianego pudełka. Umieszczony w pojemniku z wodą wskazywał azymut słońca.**

**FIG. 1. Petrus Peregrinus's an oval lodestone mounted inside a wooden box. This instrument was placed in a bowl of water for the determination of the azimuth of the sun.**

Europeans navigated the globe and discovering countries (FIG. 1).

William Gilbert, a physician of Queen Elisabeth I, have arrived at the conclusion that the earth itself is a magnet, after numerous experiments made in 1600 and documented in his book "De

Magnete" where he have made a summary of the knowledge of the time about magnetism and electricity [4].

First medical uses of magnets can be attributed with Thales of Miletus (c. 624-547 BC) who was the first to make a connection between man and magnet. He believed the soul somehow produced motions and since a magnet moves iron it also produces motions, it must possess a soul. This belief led to the many miraculous healing properties of the lodestone. Medical references to magnetism were made by Hippocrates of Cos (c. 460-360 BC), who used the stypitic iron oxides magnetite and hematite to stop bleeding and to control haemorrhage. In the first century, Pliny the Elder (23-79 AD), a Roman scholar, collected and condensed the entire knowledge of the time into an encyclopaedia, which was used for the next 1700 years. Although most ancient medical uses of magnetite were applied externally, Egyptian physician Avicenna also promoted it for internal usage as an antidote for the accidental swallowing of poisonous iron (rust). The pulverised magnetite/milk mixture was recommended also for the treatment of oedema [5]. Other medical application of magnets came to include the removal of iron particles embedded in the eye due to attracting forces of magnets. Magnetite was also recommended in nervous diseases and mesmerism. By applying it to patients, who mainly had symptoms of hysterical or psychosomatic origin, Mesmer achieved many seemingly miraculous cures [6].

In the last 20 years, the medical use of magnetism and magnets have been spread to many different fields as cardiology, neurosurgery, oncology, radiology, dentistry, to mention only a few. New applications was possible by evolution and miniaturisation of electromagnets, the development of superconducting electromagnets and the introduction of strong permanent magnets made of Sm-Co and Nd-Fe-B alloys [7]. Such materials allowed the construction of miniaturised magnets and electromagnetic coils which was so tiny that it could fit into the tip of a vascular catheter. These small catheters permitted intravascular guidance from outside of the body with a strong magnetic field and have been used clinically both for monitoring intracranial electroencephalograms and for producing electrothrombosis of inoperable arterial aneurysms. Such sophisticated technique can be also successfully use in small children heart disease diagnosis when an appropriately placed magnet was able to direct the magnetic catheter tip into the right ventricle, thus allowing for the injection of a contrast agent [8]. In others diagnostics, a patient's own blood flow can help in

stującego [8]. W innych przypadkach diagnozy, wykorzystywano własny przepływ krwi, który pomagał w przemieszczeniu substancji magnetycznej w pożądane miejsce, natomiast zewnętrzny magnes wytwarzający silne, lokalne pole magnetyczne służył do zatrzymania substancji magnetycznej w organie docelowym np. w miejscu, gdzie rozwinął się rak. Substancje magnetyczne zazwyczaj w formie nanosfer lub mikrosfer ulegają koncentracji w takim miejscu. Sfery te, zazwyczaj wypełnione chemicznymi lub radioterapeutycznymi lekami skutecznie uwalniają leki lub blokują naczynia krwionośne i kapilarne [9].

Do nowych zastosowań magnetyzmu w medycynie *ex vivo* należy bez wątpienia zaliczyć oczyszczanie szpiku kostnego w komórek rakowych za pomocą magnetycznych mikrosfer. Według standardowej procedury, szpik kostny jest pobrany od pacjenta przed zastosowaniem konwencjonalnej terapii rakowej i jest oczyszczany za pomocą jednoklonowych ciał anty-rakowych, umiejscowionych w polistyrenowych magnetycznych mikrosferach. Po takiej obróbce, oczyszczony szpik kostny jest ponownie wprowadzany do kości dostarczając pacjentowi nowe i zdrowe komórki [10]. Medyczne zastosowanie magnesów nie ogranicza się tylko do wspomnianych wyżej procedur medycznych, ale swoim zasięgiem obejmuje najnowocześniejsze techniki diagnostyczne w postaci pozytonowej topografii emisyjnej (PET) i obrazowego rezonansu magnetycznego (MRI). W pierwszej metodzie magnesy są wykorzystane w cyklotronach, gdzie wytwarza się radioizotopy tlenu ( $^{15}\text{O}$ ) o krótkim czasie połowicznego rozpadu, a po ich wstrzyknięciu pacjentowi, stosując PET można określić bio-rozkład i funkcje biochemiczne różnych organów i tkanek. Druga metoda diagnostyczna wykorzystuje korzystne właściwości magnetyczne pierwiastków. MRI jest szeroko wykorzystywana do trójwymiarowego, nieinwazyjnego przebadania ciała pacjenta i obecnie należy do najważniejszych, dostępnych metod diagnostycznych.

Człowiek jest zbudowany z atomów różnych pierwiastków otoczonych cząsteczkami wody. Atomy te reagują na siły pola magnetyczne i elektryczne. Łatwo jest więc zrozumieć, że siły pola magnetycznego lub elektromagnetycznego mogą zmieniać funkcje fizjologiczne, wywoływać różne efekty lub wpływać na organizm w sposób pozytywny lub negatywny. Zasięg i znaczenie tego zjawiska były przedmiotem badań od przeszło stu lat, ale obserwowane wyniki, ogólnie rzecz biorąc, miały małe znaczenie i statystycznie były niepewne. Badając wpływ magnetyzmu na człowieka, można ogólnie wyróżnić dwa różne typy pól magnetycznych: statyczne pole magnetyczne, które występuje wokół dużych magnesów i pole elektromagnetyczne pulsujące z częstotliwością powyżej 10 Hz. Większość naukowców zgadza się z poglądem, że pole magnetyczne do wartości 10 Tesla nie wpływa w sposób oczywisty na wzrost roślin, rozwój myszy, ciepłotę ciała czy aktywność mózgu [11]. Brak widocznych efektów oddziaływania pola magnetycznego na człowieka znajdującego się w pobliżu mocnych magnesów nie oznacza, że takiego efektu w końcu nie ma. Jest wiele ewidentnych przykładów na to, że nie tylko gołębie, pszczoły czy wieloryby ale i człowiek posiada magnetyczne receptory reagujące na pola magnetyczne [12]. Badania pokazały, że ludzie są czuli na małe zmiany w gradiencie pola magnetycznego, ale nie całego pola magnetycznego. Dowodem tego są badania odruchów różdżkarza [13]. Różdżkarz, trzymający w rękach silnie różdżkę, w pewnych warunkach fizycznych będzie czuł siłę, która mimowolnie będzie oddziaływać na różdżkę kierując ją w górę i w dół (RYS. 2). Pomiar pola magnetycznego pokazały, że odruch różdżkarza występuje wtedy, gdy on przechodzi przez obszar, gdzie znajduje się niejednorodne ziemskie pole ma-

move of magnetite substances to a target location but an externally applied magnet which produces a strong local magnetic field can be employed to stop these magnetic substances in the target organ, e.g., a tumour. The magnetic substances preferentially in the form of nanospheres or microspheres thus become concentrated in the target area. These spheres, which can be filled with chemo- or radiotherapeutic drugs, then produce their effect by releasing the drug or by blocking the vessels and capillaries [9]. A recent *ex vivo* application of magnetism in medicine is the purification of bone marrow from tumour cells with magnetic microspheres. In this standard procedure, the bone marrow is extracted from the patient previous to conventional cancer therapy and is purified by usage of a monoclonal anti-tumour antibodies conjugated to magnetic polystyrene microspheres. After cancer treatment, the cleaned bone marrow is re-infused and provides a patient with new and healthy bone marrow cells [10].

The medical use of magnets is not confined to treatment approaches, but extend to the most powerful modern diagnostics methods such as positron emission topography (PET) and magnetic resonance imaging (MRI). In the first method, magnets are used in a cyclotron to produce short-lived radioisotopes such as  $^{15}\text{O}$ . Once the radioisotopes are injected into a patient and imaged with the PET system, the biodistribution and biochemical functioning of different organs and tissues can be determined. The second diagnostic methods, takes advantage of the magnetic properties of elements. MRI is used extensively for three-dimensional, non-invasive scans of a patient's body and is currently the most important diagnostic method available.

Humans are made up of the atoms of different elements surrounded by water molecules. These atoms react to magnetic and electric forces and fields. It is therefore easy to imagine that magnetic and electromagnetic forces could alter physiologic functions, induce effect or influence the organism in a positive or negative way. The extent and importance of these phenomena has been under investigation for the last 100 years, but the effects observed have generally been minimal and seldom statistically significant. When investigating magnetic effect on humans, two different magnetic field types are generally distinguished: the static magnetic field which exists around a large magnet and electromagnetic field that pulsed at frequencies higher than 10Hz. Most scientists agree that static magnetic field of up to 10 Tesla have no obvious effects on long-term plant growth, mouse development, body temperature or brain activity [11]. The lack of apparent effects of strong magnetic fields on humans near powerful magnets does not imply that there are no effects at all. There are many evidences that no only do pigeons, bees and fin whales possess magnetic receptors, but humans do too [12]. Research indicates that humans are sensitive to small changes in magnetic fields gradients, but not to the overall magnetic field. Evidence supporting this has come from studies of the dowser reflex [13]. A dowser, a person holding firmly a divining rod, will have a force under certain physical conditions experience that results in an involuntary upward and downward movement of their rod (FIG. 2). Magnetic field measurements have shown that the dowser reflex occurs when the dowser passes through a region where the earth's magnetic field is not entirely uniform. This field anomaly produces a magnetic field gradient, which must exceed  $8 \text{ mA/m}^2$  ( $0.1 \text{ mOe/m}$ ) to be detected. The speed with which the dowser passes through this field gradient also influences his magnetic reception. The dowser must pass through such a field gradient within at least one second to detect it. Furthermore, adding up small differences in field gradients can increase

gnetyczne. Nieprawidłowość pola wytwarza gradient pola magnetycznego, które aby zostało wykryte musi przewyższać poziom  $8 \text{ mA/m}^2$  ( $0.1 \text{ mOe/m}$ ). Szybkość z jaką różdżkarz przemieszcza się przez gradient pola także ma wpływ na jego magnetyczny odbiór. Różdżkarz musi przejść przez taki gradient pola w ciągu jednej sekundy aby go wykryć. Dlatego tego uwzględniając niewielkie różnice w gradientach pól może wzrastać poziom wykrycia takiego pola. Jednakże większe gradienty pól magnetycznych, prowadzą do pewnego nasycenia i mogą one być wykryte tylko podczas szybszego przemieszczania się. Fizjologiczne wytłumaczenie zjawiska odruchu różdżkarza opiera się na fizjologicznej indukcji momentów magnetycznych, prądów elektromagnetycznych i nuklearnego rezonansu magnetycznego. Dostępne dane wskazują, że człowiek jest wrażliwy na zmienne pola elektromagnetyczne. Badania epidemiologiczne nawet sugerują zdrowotny wpływ przypisywany odpowiednio małym polom magnetycznym jakich obecność stwierdzono pod liniami wysokiego napięcia. Zanim jednak pojawią się teorie oparte na mechanizmach oddziaływań molekularnych, jest bardzo trudno sprawdzić lub obalić jakkolwiek związek pomiędzy chorobą, a małymi polami magnetycznymi wytwarzanymi w pobliżu urządzeń elektrycznych, maszyn, przewodów mocy a nawet komputerów. W aktualnych badaniach laboratoryjnych stosowane są coraz to bardziej wyrafinowane techniki badawcze, bardziej czułe aparaty oraz stosowane są bardziej udoskonalone metody statystyczne jakie nie były przedtem używane. Wiążąc to z naszym głębszym zrozumieniem przykładów rezonansu magnetycznego w tkance te niezmiernie udoskonalone metody instrumentalne powinny także przyczynić się do jeszcze lepszego zrozumienia wpływu pola elektromagnetycznego na poziomie komórki i molekularnym. Prowadzi to wszystko do nowych technik medycznych opartych na zjawisku magnetyzmu, służących celom diagnozy i terapii.

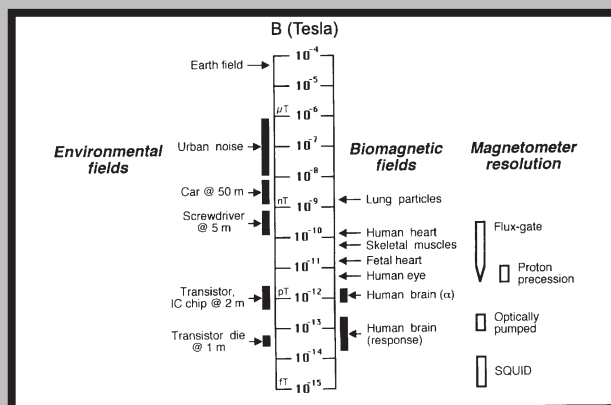
W 1820 roku Hans Oerstedt odkrył i zanotował, że prąd płynący przez objętość masy wytwarza pole magnetyczne. Takie prądy także występują w ciele ludzkim wytwarzając biopole magnetyczne wykrywalne na zewnątrz ciała. Jednym ze źródeł tych słabych, zmiennych pól są małe prądy jonów w materii żywej. Prądy te wytwarzane są z kolei przez duże masy wzbudzonych, synchronicznie kurczących się tkanek takich jak na przykład mięsień sercowy. Sygnały biomagnetyczne są niezwykle słabe w porównaniu w ziemskim polem magnetycznym lub zakłóceniami powodowanymi hałasem miejskim. Te biomagnetyczne pola są rzędu od pikotesli do femtotesli, natomiast częstotliwości wynoszą od około 1 Hz do kHz (RYS. 3). Silniejsze pola są wytwarzane przez ludzkie serce (magnetokardiogram) i przez mięśnie szkieletowe (magnetomyogram). Neuromagnetyczne sygnały (magnetoencefalogram) są znacznie słabsze. Inne elektrycznie czułe narządy także wytwarzają swoje własne biopole magnetyczne nazwane w przypadku oka magnetookulogramem (MOG) i magnetoretinogramem (MRG), w przypadku żołądka magnetogastrogramem (MGG), w przypadku serca i mózgu noworodka odpowiednio fetal-magnetokardiogramem (FMCG) lub fetal-magnetoencefalogramem (FMCG), w przypadku nerwów obwodowych magnetoneurogramem (MNG). Przeprowadzając badania biomagnetyczne stykamy się z podwójnym problemem, ponieważ musimy przeprowadzić pomiar bardzo słabych sygnałów biomagnetycznych w obecności hałasu magnetycznego otoczenia, które jest o kilka rzędów wielkości silniejsze niż wykrywane pola. Dlatego też, potrzebny jest bardzo czuły sensor jakim jest tzw. SQUID, pozwalający zredukować hałas otoczenia poniżej mierzonego sygnału. Istnieje kilka firm, które oferują handlowe urządzenia bio-



RYS. 2. Różdżkarz trzymający różdżkę podczas poszukiwań podziemnego źródła wody (z Abbe de Vallemont's "Rozprawa na temat różdżki", Paryż, 1693). FIG. 2. Dowser holding a divining rod while searching for underground water (from Abbe de Vallemont's "Treatise on the divining rod", Paris, 1693).

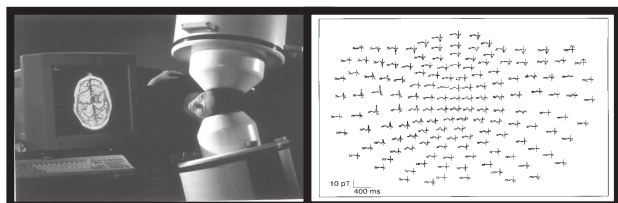
the detection level. Higher magnetic field gradients, however, lead to saturation and can only be detected by going faster. Physiological explanations of the dowser reflex have included the physiological induction of magnetic moments, electromagnetic currents and nuclear magnetic resonance. Available data indicate that humans are susceptible to alternating electromagnetic fields. Epidemiological studies even suggest health effects attributed to relatively small magnetic fields such as the ones found underneath a high-voltage line. Unless new theories for these effects are proposed on the grounds of molecular mechanisms, it is very difficult to prove or disprove any association between disease and the small magnetic fields produced near electric devices, machines, power lines and even computers. Current laboratory investigations employ more sophisticated techniques, more sensitive instruments and more refined statistical methods than ever before. Combining with our deeper understanding of magnetic resonance patterns in tissue this vastly improved instrumentation should provide our understanding of the electromagnetic field effects at the cellular and molecular level. This will lead to the introduction of new, magnetism-based medical techniques for diagnosis and therapy.

In 1820 Hans Oerstedt found and wrote down that a current flowing through a volume produces a magnetic field. Such currents also occur in the human body producing biomagnetic fields detectable outside the body. One source



RYS. 3. Indukcja magnetyczna biopola magnetycznego, zakłócenia środowiskowe pola magnetycznego i rozkład magnetometru.

FIG. 3. Magnetic induction of biomagnetic fields and of environmental magnetic field disturbances as well as magnetometer resolution (J. Vrba).



**RYS. 4. Urządzenie diagnostyczne Magnes II firmy Technologis Inc. san Diego, USA i zapis refleksów chorego na epilepsję pacjenta (z lewej).**

**FIG. 4. Diagnostic device Magnes II from Biomagnetic Technologis Inc. San Diego, USA, and recorded epileptic pikes of the ill patient (left).**

magnetyczne i/albo do badań serca albo mózgu. Wszystkie te układy pomiarowe zaprojektowano w zamyśle do badawczych celów klinicznych, obsługiwanych rutynowo przez szpitalne wykwalifikowane służby (RYS. 4).

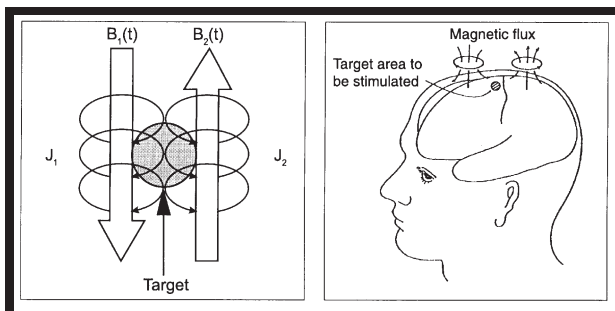
Jak już powyżej wspomniano urządzenia biomagnetyczne można z powodzeniem stosować w celach szeroko pojętej diagnostyki medycznej takiej jak kardiomagnetyzm, neuromagnetyzm itp., ale jednym z najbardziej fascynujących zastosowań magnetyzmu jest stymulacja magnetyczna ludzkiego mózgu. Do przyszłościowych celów tych eksperymentów należy niewątpliwie lepsze poznanie zarówno funkcjonowania ludzkiego mózgu jak i odkrycie możliwości niesienia pomocy pacjentom chorym na chorobę Alzheimera, Parkinsona czy raka mózgu.

Stymulację magnetyczną nerwu szeroko stosowano w badaniach neurofizjologicznych i diagnostyce klinicznej. Rozwinięto metodę skupionej (ogniskowej) i kierunkowej stymulacji ludzkiego mózgu. Maass i Asa [14] zaproponowali stymulację podobną do działania transformatora, w której wiązka nerwowa została potraktowana jako wtórne uzwojenie. Pokazali, że zmiana przepływu prądu w rdzeniu może być zastosowana do wzbudzenia nerwów. Oberg [15] zaproponował stymulację typu szczeliny powietrznej, w której wiązka nerwowa została wystawiona na działanie zmiennego pola magnetycznego. Badania te pokazały w sposób eksperymentalny, że wzbudzone prądy wirowe w błonie tkankowej mogłyby stymulować nerwy. Eksperyment przeprowadzono na wielkim aksonie homara mierząc wielkość potencjału czynnościowego przy zmiennych w czasie polach magnetycznych. Błona aksonu była wzbudzana za pomocą stymulacji galwanicznej, a potencjał czynnościowy rejestrowano międzykomórkowo za pomocą mikroelektrod. Podczas propagacji potencjału czynnościowego wzdłuż aksonu, stosowano zmienne lub impulsowe pola magnetyczne w przez środek aksonu w celu zbadania czy pola magnetyczne mają jakikolwiek wpływ na takie parametry jak prędkość przewodzenia, oporność włókna nerwowego i amplitudy, okres trwania i rodzaj potencjału czynnościowego. Wyniki pokazały, że wzbudzenie nerwu za pomocą pola magnetycznego odbywało się w sposób pośredni poprzez wzbudzenie prądów wirowych w otaczającej nerw tkance. Gęstość wzbudzonego prądu zależy zarówno od czynnika geometrycznego jak i od oporności tkanki przez którą przepływa prąd. Dla wzbudzenia nerwu, ważniejsze są makroskopowe prądy wirowe niż mikroskopowe, które płyną wzdłuż aksonu nerwowego i w otaczającej nerw tkance, tak, że uczestniczą one w depolaryzacji błony [16]. W następnych eksperymentach wprowadzono do ciała zaizolowany rdzeń magnetyczny, na którym umieszczono wiązkę nerwową. Teraz prądy wirowe płynące w płynach fizjologicznych ciała opływały rdzeń i kiedy zmieniano strumień magnetyczny w rdzeniu mogły one stymulować nerw. Pomie-

of weak fluctuating fields are the small ion currents in living materials. These currents are produced by large masses of excitable, synchronously firing tissue such as heart tissue. Biomagnetic signals are extremely weak in comparison with the earth's magnetic field or disturbances caused by urban noise. These weak biomagnetic fields are in the order of picotesla and femtotesla, at frequencies from a fraction of Hertz to kiloHertz (FIG. 3). The strongest field is generated by the human heart (magnetocardiogram) and by skeletal muscles (magnetomyogram). Nueromagnetic signals (magnetoencephalogram) are much weaker. Biomagnetic fields are also known from others electrically organs; the eye as the magnetooculogram (MOG) and magneto-retinogram (MRG), the stomach as magnetogastrogram (MGG), the fetal heart and brain (fetal-magnetocardiogram: FMCG or fetal-magnetoencephalogram: FMEG, respectively) and the peripheral nerve as the magnetoneurogram (MNG). When performing biomagnetic investigations we are faced with twofold problems: very weak biomagnetic signals have to be measured in the presence of environmental magnetic noise which is many orders of magnitude stronger than the fields to be detected. Therefore, a very sensitive sensor (SQUID) is needed for reducing the ambient noise below the signal to be measured. There are several companies, which offer commercial biomagnetic instrumentation either for heart and/or for brain biomagnetic investigations. All these systems have been designed with the clinical user in mind and hospital technician staff routinely operates most of them (FIG. 4).

As was mentioned above the biomagnetism instrumentation can be successfully applied in a broad medical diagnostics purposes such as in cardiomagnetism, neuromagnetism, and etc., but there is one most fascinating possible application of magnetism in magnetic stimulation of the human brain. The future aim of these experiments will be better understand the functionality action of the human brain as well as the discovery of the possibilities for helping patients in Alzheimer and Parkinson diseases and brain tumors.

Magnetic nerve stimulation has been widely used in neurophysiological studies and clinical diagnosis. A method of focal and vectorial stimulation of the human brain has been developed. Maass & Asa [14] proposed a transformer type stimulation, in which a nerve bundle was threaded through a core as the secondary winding. They demonstrated that the flux change in the core could be used to excite nerves. Oberg [15] proposed an airgap type stimulation, in which a bundle of nerve was exposed to alternating magnetic fields. These studies demonstrated experimentally that induced eddy currents in the membrane tissues could be expected to stimulate nerves. An experiment was carried out to measure action potentials of lobster giant axons under time-varying magnetic fields. The axon membrane was excited by galvanic stimulation, and the action potential was recorded intercellularly with microelectrodes. During the propagation of the action potential along the axon, alternating or pulsed magnetic fields were applied across the middle of the axon to study whether magnetic fields have any effect on parameters such as the conduction velocity and refractory period of the nerve fibre and the amplitude, duration and shape of action potentials. Results revealed that nerve excitation by magnetic field influence are mediated via the induction eddy current in the tissue surrounding the nerve. The current density induced depends on geometrical factors as well as the resistivity of the tissue in which the current flows. For nerve excitation, the macroscopic eddy currents are more important than the microscopic ones that flow along the nerve axon and in the tissues surrounding the nerve, as they contribute to the depolarisation of the membrane [16].

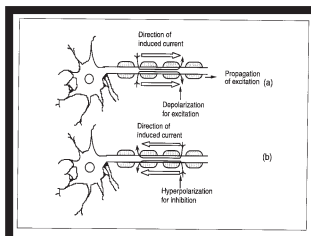


**RYS. 5. Zasada działania lokalnej stymulacji (z lewej) i para cewek umiejscowiona na zewnątrz głowy (z prawej).**

**FIG. 5. Principle of localised stimulation (left) and a pair of coils placed outside the head (right).**

dzy rdzeniem a nerwem nie było wzajemnego połączenia. Ta metoda utwierdziła w przekonaniu, że system nerwowy odpowiada na zmienne w czasie pole magnetyczne poprzez prądy wirowe wzbudzone w ciele.

Powyższe badania przyczyniły się do powstania głównego pomysłu na miejscową stymulację mózgu poprzez skoncentrowanie wzbudzonych prądów wirowych we wskazanym miejscu za pomocą pary zmiennych w czasie pól magnetycznych (RYS. 5). Parę cewek ustawiono na zewnątrz głowy tak, że zmienne w czasie pola magnetyczne,  $B_1(t)$  i  $B_2(t)$ , przechodziły przez głowę w przeciwnych kierunkach wokół miejsca przeznaczenia (celu). Wzbudzone prądy wirowe  $J_1$  i  $J_2$ , jak należało się spodziewać, płynęły razem. Zbieżność prądów wirowych przyczyniła się do wzrostu gęstości prądu w celu, gdzie nastąpiła depolaryzacja tkanki nerwowej. Ta metodę zaproponowano do nagrzewania raka mózgu [17].



**RYS. 6. Kierunek stymulującego prądu i wzbudzenie nerwu.**  
**FIG. 6. Direction of stimulating current and neural excitation.**

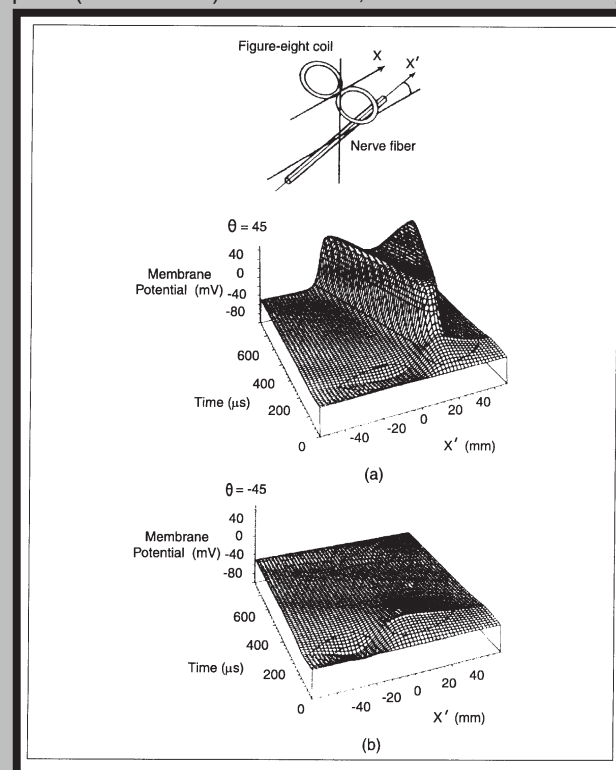
Dzięki przeprowadzonym wielu eksperymentom stymulacji tkanki nerwowej za pomocą pola magnetycznego było możliwe opracowanie modelu wzbudzenia nerwu. Istnienie orientacji w mózgu może być częściowo zrozumiane za pomocą anatomicznej struktury tkanki nerwowej w korze mózgowej. Model kąтового wzbudzenia oparto na przypuszczeniu, że nerw jest łatwo wzbudzany gdy indukowane prądy wirowe płyną w kierunku równoległym do włókna nerwowego przy czym prostopadły do włókna nerwowego składnik prądu wzbudzenia ma małe znaczenie [18].

RYS. 6 pokazuje schematyczny diagram opisujący wzbudzenie nerwu za pomocą prądów wirowych. Kiedy prądy wirowe są wzbudzone za pomocą zmiennych w czasie pól magnetycznych w kierunku od ciała do jego końcowych części, to depolaryzowane części są wzbudzone, a wzbudzona błona propaguje wzbudzenie wzdłuż włókna nerwowego od części wzbudzonej do jego końca (sytuacja "a"). W przeciwnym przypadku, gdy indukowane prądy wirowe płyną w kierunku od końcowych części do ciała, nadmierne spolaryzowane części hamują stymulację nerwów nawet, gdy depolaryzowane części bliskie ciała mogłyby być wzbudzone. To założenie zostało częściowo zweryfikowane eksperymentalnie po przez elektryczną stymulację ludz-

In next experiments an insulated magnetic core was implanted in the body with a nerve bundle positioned on the core aperture. The eddy currents that flowed in the body fluids around the core when the magnetic flux in the core was changed could stimulate the nerve. No interlinkage existed between the core and the nerves. It was a good method for verifying that the nervous system responds to time-varying magnetic fields via eddy currents induced in the body. The basic idea of localised stimulation of the brain is to concentrate induced eddy currents in the target area by a pair of time-varying magnetic fields (FIG. 5). A pair of coils is positioned outside the head so that the time-varying magnetic fields,  $B_1(t)$  and  $B_2(t)$ , pass through the head in opposite directions around the target. The induced eddy currents,  $J_1$  and  $J_2$ , are expected to flow together. This convergence of eddy currents acts to raise the current densities in the target area, where depolarisation of neural tissues can be caused. This method was proposed to heat brain tumours [17].

Due to many experiments with magnetic neural tissue stimulation it could be possible to elicit nerve excitation model. The existence of the orientation in the brain may be partially understood by the anatomical structure of the neural tissues in the cortex. The excitation angle model was based on the assumption that a nerve is excited easily when induced eddy currents flow in the direction parallel to the nerve fiber but the component of stimulation currents perpendicular to the nerve fiber has a little meaning [18].

FIG.6 shows schematic diagrams with describe the neural excitation by induced eddy currents. When the eddy currents that are induced by time varying magnetic fields flow in the direction from soma to distal parts, the depolarised parts are excited, and the membrane excitation propagates along the nerve fiber from the excited parts to the distal parts (situation "a"). In contrast, when the induced eddy



**RYS. 7. Zmiany w potencjale błony neuronowej w zależności od różnego kąta pomiędzy nerwem a cewką.**

**FIG. 7. Change in neural membrane potential at various angles between nerve and figure-eight coil.**

kiej ręki. Gdy środkowy nerw stymulowano w kierunku od miejsca bliższego ciała do części dalszych otrzymano czysty sygnał w postaci elektromyogramu (EMG) od mięśnia dłoni. W przeciwnym przypadku, gdy środkowy nerw stymulowano w kierunku przeciwnym, otrzymano bardzo słaby sygnał EMG (sytuacja "b").

Wzbudzenie włókien nerwowych w funkcji kierunku kąta pomiędzy cewką a aksonem nerwowym było przedmiotem symulacji komputerowej, opracowanej przez Roth'a i Basser'a [19], w której zastosowali parametry modelu opracowanego wcześniej przez Frankenhauser'a-Huxley'a. Symulacja polegała na zastosowaniu miejscowej i kierunkowej stymulacji nerwu z użyciem cewki w kształcie ósemki (RYS.7), gdzie oś X przebiega równoległe do stycznnej obu cewek. Poniżej punktu przecięcia, wzbudzone prądy płyną równoległe do osi X. Oś X" przebiega równoległe do włókna nerwowego. Gdy kąt pomiędzy cewką a nerwem wynosi  $45^\circ$  (sytuacja "a"), nerw jest wzbudzony w punkcie  $X=20\text{mm}$ , a wzbudzenie propaguje do obu stron włókna nerwowego. W przeciwnym przypadku, gdy kąt pomiędzy cewką a nerwem wynosi  $-45^\circ$ , (sytuacja "b"), to nerw nie jest wzbudzany. Wyróżnienie modelu częściowo zweryfikowano za pomocą doświadczeń z wyizolowaną wiązką nerwową pochodzącą od żaby, którą stymulowano za pomocą indukowanych magnetycznie prądów elektrycznych. Istnienie kierunkowej charakterystyki stymulujących prądów stosowanych do wzbudzania nerwów zastanawia zarówno nad funkcjonowaniem jak i nad anatomiczną organizacją włókien nerwowych w mózgu. Również wyniki badań stymulacji zakończeń struktur nerwowych mogą być pomocne w zrozumieniu mechanizmu wzbudzenia nerwu za pomocą stymulacji magnetycznej zewnętrznych i centralnych systemów nerwowych. Rozpoznanie różnic w poziomie wzbudzenia neuronowego w mózgu mogłoby być również pomocne w diagnostyce medycznej w przypadkach tak często spotykanych obecnie chorób cywilizacyjnych jakim jest zarówno choroba Alzheimera jak i nowotwory mózgu.

currents flow in the direction from the distal parts to the soma, hiperpolarised parts inhibit neural excitation even if the depolarised parts near the soma can be excited. This assumption was partially verified by an experiment of electrical stimulation of the human arm. When the median nerve was stimulated in the direction from the proximal to the distal part, a clear electromyograms (EMG) signal was recorded from the thenar muscle. In contrast, when medial nerve was stimulated in the opposite direction, very weak EMG signals were obtained (situation "b").

The excitation of neural fibers as a function of direction of angle between the figure-eight coil and nerve axon was simulated using the parameters of the Frankenhauser-Huxley model by Roth and Basser [19] who modified it by application the focal and vectorial stimulation with a figure-eight coil for neural excitation (FIG.7). The X-axis runs parallel to the tangent of both circular coils. Below the intersection, induced currents flow parallel to the X-axis. The X"-axis runs parallel to the nerv fiber. When the angle between the figure-eight coil and the nerve is  $45^\circ$  (situation "a"), the nerve is excited at the point  $X=20\text{mm}$ , and the excitation propagates to both sides of the nerve fiber. In contrast, when the angle between the figure-eight coil and the nerve is  $-45^\circ$ , (situation "b"), the nerve fiber is not excited. The validity of the model was partially verified by experiments using a frog's isolated nerve bundle stimulated by magnetically induced electric fields.

The existence of the vectorial characteristics of stimulating currents for neural excitation reflects both the functional and anatomical organisation of the neural fibers in the brain. Also, the results of the stimulation of finite neuronal structures may help in understanding nerve excitation through magnetic stimulation of both peripheral and central nervous systems. The recognition of the differences of the neural excitation level in brain could be helpful in medicine diagnosis in the case of often-met civilised Alzheimer as well as brain tumour disease.

## Piśmiennictwo

- [1] Walcott, C., Gould, J.L. & Kirschvink J.L., (1979). *Science* 205, 1027.
- [2] Oresti, D., Petigrew, J.D., (1980). *Nature* 285, 999.
- [3] Peregrinus, P. (1269). *Epistola Petri Peregrini de Micourt ad Sygerum de Foucacoourt, Militem, De Magnete*. privately published, Italy.
- [4] Gilbert, W. (1600). *De Magnete, Magneticisque, Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*. *Physiologica Nova*, Dover. Paperback re-publication, 1991.
- [5] Stecher, G.t. (1995). *Magnetismus in Mittelalter: Von den Fähigkeiten und der Verwendung des Magneten im Mittelalter in Dichtung. Alltag und Wissenschaft*. Ph.D. thesis, Goppingen.
- [6] Mourino, m.R. (1991) *From the Thales to Lauterbur, or from the lodestone to MRI: Magnetism and Medicine*. *Radiology*, 180, 593-612.
- [7] Livingston, J.D. (1996). *Driving force: The natural magic of magnets*. Harvard University Press, Cambridge, USA.
- [8] Ram, W & Meyer, H. (1991) *Heart catheterization in a neonate by interacting magnetic fields: A new and simple methods of catheter guidance*. *Catheterization and Cardiovascular Diagnosis*, 22, 317-319.
- [9] Poznansky, M.J. & Juliano, R.L. (1984). *Biological approaches to the controlled delivery of drugs: A critical review*. *Pharmacological Reviews*, 36, 277-336.
- [10] Treleaven, J.G., et.all., (1984). *Removal of neuroblastoma cells from bone marrow with monoclonal antibodies conjugated to magnetic microspheres*. *The Lancet*, pp. 70-73.

## References

- [11] Maret, G. Kiepenheuer, J., & Boccara, N. (1986) *Biophysical effects of steady magnetic fields*. Springer Verlag, Berlin.
- [12] Kirschvink, J.L., et.all., (1992b). *Magnetite biomineralisation in the human brain*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 89, 7683-7687.
- [13] Rocard, Y. (1964). In M.F. Barnothy, (Ed.), *Biological effects of magnetic fields, Actions of a very weak magnetic gradient: The reflex of the dowser*, pp. 279-286. Plenum Press, New York.
- [14] Maass, J. A. & Asa, M.M. (1970). *Contactless nerve stimulation and signal detection by inductive transfer*. *IEEE Trans. Magn.* MAG-6, 322-326.
- [15] Oberg, P.A. (1973). *Magnetic stimulation off nerve tissue*. *Med. Biol. Eng.*, 11, 55-64.
- [16] Ueno, S., Lovsund, P., & Obereg, P.A. (1986). *Effects of time-varying magnetic fields on action potential in lobster giant axon*. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 24, 521-526.
- [17] Ueno, S., Tashiro, T., Kamise, S., & Harada, K. (1987). *Localized hyperthermia by means of a pair-coil configuration: calculation of current distributions in cubical model*. *IEEE Trans. Magn.* MAG-23, 2437-2439.
- [18] Ueno, S., Matsuda, T., & Fujiki, M. (1990). *Functional mapping of the human motor cortex obtained by focal and vectorial magnetic stimulation of the brain*. *IEEE Trans. Magn.*, 26 (5), 1539-1544.
- [19] Roth, B.J. & Basser, P.J. (1990). *A model of stimulation of a nerve fiber by electromagnet induction*. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 37(6), 588-597.