PRACE POGLĄDOWE

Marek Zmyślony

BIOFIZYCZNE MECHANIZMY DZIAŁANIA PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH A SKUTKI ZDROWOTNE*

BIOPHYSICAL MECHANISMS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS INTERACTION AND HEALTH EFFECTS

Z Zakładu Zagrożeń Fizycznych
Instytutu Medycyny Pracy im. prof. dra med. *J. Nofera* w Łodzi

Streszczenie
Problem biologicznego działania pól elektromagnetycznych (PEM) jest obiektem zainteresowania od ponad 100 lat. Wśród specjalistów panuje zgodna opinia, że ekspozycja na PEM o wartościach bardzo dużych powoduje w organizmie negatywne skutki, natomiast wątpliwości dotyczą PEM o wartościach spotykanych w praktyce w środowisku komunalnym i na stanowiskach pracy. Dotyczą one nie tylko możliwości wystąpienia efektów zdrowotnych, ale nawet mechanizmów biofizycznych mogących u podstaw takich efektów leżeć. W pracy krótko przedstawiono te kontrowersje. Stwierdzono, że w chwili obecnej nie ma wystarczających dowodów na uznanie PEM jako czynnika szkodliwego dla zdrowia (może poza związkiem magnetycznego pola sieciowego z niektórymi nowotworami, a zwłaszcza białaczkami u dzieci). Nie wiadomo również jakie mechanizmy biofizyczne mogą leżeć u podstaw ewentualnych skutków zdrowotnych. Nie oznacza to jednak, że można zaprzestać prac w tej dziedzinie. Duża liczba niekiedy pojedynczych obserwacji skłania wręcz do ich zintensyfikowania. Med. Pr., 2006;57(1):29–39

Słowa kluczowe: PEM, pole elektryczne, pole magnetyczne, efekty zdrowotne, mechanizmy działania

Abstract
The issue of the biological effect of electromagnetic fields (EMF) has been the subject of interest over one hundred years. Experts in this field agree that exposure to EMF at high levels induce adverse health effects, but their opinions vary on the point whether EMF at levels usually present in the municipal environment and at workposts are also harmful. The expressed doubts apply not only to possible health effects, but also to biophysical mechanisms by which those effects occur. The paper presents these controversies. In general opinion there is as yet no conclusive evidence to consider EMF as a factor harmful to health (may be except the relationship between power frequence magnetic field and some neoplastic diseases, especially leukemia in children). It is also unknown which of biophysical mechanisms may be the underlying reason for possible health effects. All these mean that studies in this area should be continued. A large number of single observations sometimes encourage researchers to intensify their investigations. Med Pr 2006;57(1):29–39

Key words: EMF, electric field, magnetic field, health effects, mechanisms of interaction

Adres autora: św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: zmyslmar@imp.lodz.pl
Nadesłano: 8.09.2005
Zatwierdzono: 31.10.2005
© 2006, Instytut Medycyny Pracy im. prof. dra med. *J. Nofera* w Łodzi

WSTĘP

Problem biologicznego działania pól elektromagnetycznych (PEM), a zwłaszcza jego skutków zdrowotnych, jest obiektem zainteresowania od ponad 100 lat. Od 1895 r. opublikowano ponad 35 000 prac na ten temat (1). Jak dotychczas nie dopracowano się jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o szkodliwość ekspozycji na PEM dla zdrowia. Może o tym świadczyć fakt, że od roku 1980 ukazało się ponad 8000 publikacji z dziedziny bioelektromagnetyzmu (2), a także jest podejmowana współcześnie ogromna ilość badań. W bazie danych Międzynarodowego Projektu WHO „Pola elektromagnetyczne" znajduje się opis 1219 projektów badawczych zrealizowanych bądź realizowanych od momentu inauguracji Programu, tj. od 1996 r. Wśród tych projektów są 184 badania epidemiologiczne z czego 135 badań dotyczy działania kancerogennego PEM (3). Wśród specjalistów panuje zgodna opinia, że ekspozycja na PEM o bardzo dużych wartościach powoduje w organizmie negatywne skutki, natomiast

* Praca wykonana w ramach zadnia finansowanego z dotacji na działalność statutowa nr IMP 18.1 pt. „Ocena procesów oksydacyjnych w limfocytach *in vitro* poddanych ekspozycji na ciągłe promieniowanie elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości". Kierownik: dr hab. *M. Zmyślony.*

wątpliwości dotyczą PEM o wartościach spotykanych w praktyce w środowisku komunalnym i na stanowiskach pracy. Dotyczą one nie tylko możliwości wystąpienia efektów zdrowotnych, ale nawet mechanizmów biofizycznych, które mogą leżeć u podstaw takich efektów. Poniżej te kontrowersje zostaną krótko przedstawione. Omówienie to zostanie dokonane dla pól stałych i wolnozmiennych (ze względu na podobieństwo ich mechanizmów działania) oraz pól wielkiej częstotliwości (w.cz.), przy czym przyjęto, że górna granica pól wolnozmiennych wynosi około 1 MHz.

STAŁE I WOLNOZMIENNE POLA ELEKTRYCZNE

W przypadku pól elektrycznych stałych i niskiej częstotliwości głównymi biofizycznymi mechanizmami efektów biologicznych (w tym i zdrowotnych) wydaje się być:

- działanie siły elektrycznej na cząsteczki biologiczne,
- indukowanie dodatkowego potencjału na błonach komórkowych.

Obliczenia wykazały, że siły elektryczne, działające na cząsteczki biologiczne, są znikomo małe ze względu na bardzo duże tłumienie pola elektrycznego przez ciało człowieka, np. pole zewnętrzne o częstotliwości 60 Hz jest tłumione około 10^6 razy (4). Szacuje się, że ekspozycja na zewnętrzne pole elektryczne o częstotliwości 60 Hz i natężeniu 1 kV/m powoduje powstanie w organach wewnętrznych pola o wartości 1–3 mV/m (5). Wewnątrz błon pole jest większe (ze względu na własności dielektryczne błon komórkowych, pomiędzy ich powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną występuje znaczna różnica potencjału), np. pole elektryczne o natężeniu 1 mV/m, działające na komórkę o średnicy 20 μm, powoduje powstanie wewnątrz niej błony o grubości 6 nm pola o natężeniu około 2,5 V/m (6). Wynika z tego, że zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu 1 kV/m spowoduje powstanie wewnątrz błony pola indukowanego o natężeniu około 2,5 V/m.

Na podstawie analizy różnych zjawisk fizycznych, mogących być przyczyną efektów biologicznych, można stwierdzić, że do ich wywołania potrzebne są pola elektryczne o bardzo dużych wartościach. Na przykład do wprawienia cząsteczek w ruch wirowy wymagane są zewnętrzne pola elektryczne o natężeniu kilku tysięcy kV/m, jako że zjawisko to wymaga działania na cząsteczki pola o natężeniu kilku kV/m (7), a do znaczącego biologicznie skręcenia cząsteczki białka wymagane jest pole o wartości natężenia ponad 10^9 V/m (skręcenie cząsteczki białka spowodowane przez pole elektryczne o natężeniu 2,5 V/m wynosi około $2 \cdot 10^{-26}$ Nm, podczas gdy endogenne skręcenie mitochondrialnej F_1 ATPazy, otrzymującej energię z hydrolizy ATP wynosi około $4,5 \cdot 10^{-20}$ Nm (8), czyli ponad 6 rzędów wielkości niższe).

Z powyższej analizy wynika, że skoro siły związane z ekspozycją na pola elektryczne, występujące w środowisku są niewielkie, to również energia przekazywana przez to pole cząsteczkom biologicznym jest stosunkowo mała. Dla cząsteczki enzymu o masie 10^6 i elektrycznym momencie dipolowym $3,2 \cdot 10^{-26}$ Cm, poddanej działaniu pola 1 mV/m, może się wahać od $10^{-13} k_B\tau$ do $10^{-5}\ k_B\tau$ (k_B – stała Boltzmanna, τ – temperatura w skali Kelwina), podczas gdy najsłabsze chwilowe wiązanie związane z siłami Van der Waalsa wynosi około $1,62\ k_B\tau$ (6).

Również rozważania dotyczące możliwości wywoływania przez stałe i wolnozmienne pola elektryczne szkodliwych efektów zdrowotnych poprzez indukowanie w tkankach dodatkowego potencjału na błonach komórkowych doprowadziły do wniosku, że w praktyce pola te nie mogą zagrażać zdrowiu człowieka. Analiza danych doświadczalnych na temat wartości progowych pola, powodujących stymulacje komórek pobudliwych, dokonana przez Bernhardta (9), wykazała, że dla pól o częstotliwości 60 Hz są one wyższe o około 10^3 kV/m, a więc wartości niespotykane w praktyce higienicznej.

Z tego, co napisano wyżej, wynika, że stałe i wolnozmienne pole elektryczne o wartościach spotykanych w praktyce higienicznej, nie ma energii niezbędnej do wywoływania efektów biofizycznych, mogących bezpośredniego wpływać na funkcjonowanie organizmu. We współczesnej literaturze bioelektromagnetycznej nie ma też prac wiążących ekspozycje na stałe i wolnozmienne pola elektryczne z efektami zdrowotnymi (z wyjątkiem jednoczesnego działania pola elektrycznego i magnetycznego). Inaczej wygląda sytuacja w przypadku stałych i wolnozmiennych pól magnetycznych, a zwłaszcza pól sieciowych (czyli 50/60 Hz) czy ogólniej PEM z zakresu ELF*.

STAŁE I WOLNOZMIENNE POLA MAGNETYCZNE

Od przełomu lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych, gdy pojawiły się pierwsze doniesienia na temat związku zachorowalności dzieci na białaczki i guzy mózgu z wyposażeniem gospodarstw domowych w sprzęt elektryczny i bliską odległością od linii wysokiego na-

* ELF (extremely low frequency) – zakres częstotliwości powyżej 0 Hz do 300 Hz.

pięcia (na podstawie tych danych szacowano wielkość ekspozycji w domach) (10) oraz zwiększonej umieralności na białaczki pracowników wykonujących „zawody elektryczne" (11), szczególne zainteresowanie budzi możliwość kancerogennego działania sieciowych PEM. W latach 1980–2002 wykonano prawie 200 oryginalnych badań epidemiologicznych ryzyka zachorowania na nowotwory u osób eksponowanych na podwyższone sieciowe pola magnetyczne, w tym ponad 70 u ludności i ponad 110 u pracowników energetyki (12). Wyniki tych badań, w tym również metaanalizy wykonane przez Ahlboma i wsp. (13) czy Greenlanda i wsp. (14), spowodowały, że w 2002 r. Międzynarodowa Agencja Badań Nad Rakiem (IARC) uznała pole magnetyczne zakresu ELF za przypuszczalnie rakotwórcze dla ludzi (grupa 2B), czyli uznano, że istnieje ograniczony dowód działania rakotwórczego tych pól na ludzi przy braku wystarczającego dowodu rakotwórczości u zwierząt doświadczalnych.

Sieciowe pola magnetyczne podejrzane są również o inne niż kancerogenne, szkodliwe działanie na organizm człowieka, np. na ośrodkowy układ nerwowy (stwardnienie boczne zanikowe (15), choroba Altzheimera (16) czy większa częstość zaburzeń psychiatrycznych (17)), na układ sercowo-naczyniowy (zwiększenie ryzyka względnego zgonu z powodu zaburzeń rytmu i zawału serca (18), wzrost odsetka osób z podwyższonym ciśnieniem tętniczym i zaburzoną dzienno-nocną regulacją ciśnienia krwi (19), wzrost ryzyka zaburzenia zmienności rytmu serca (20)) czy na funkcje rozrodcze (wzrost liczby poronień w „silnych" – większych od 0,63 μT – pola występujących w miejscach zamieszkania (21), nieprawidłowy wynik ciąży u kobiet pracujących przy przemysłowych maszynach szwalniczych – pola 11–20 μT (22), zaburzenie stosunku liczby dziewczynek do liczby narodzonych chłopców wśród potomstwa mężczyzn zatrudnionych w stacjach elektroenergetycznych o napięciu 400 kV (23,24)). Jednakże obserwacje te są pojedyncze i nie spełniają wszystkich kryteriów uznawania badań – za wiarygodne, np. nie zostały one powtórzone przez inne zespoły badawcze, a dane tych badań – porównywane niezależnie.

Tak duża liczba obserwacji dotyczących efektów zdrowotnych ekspozycji na sieciowe pola magnetyczne powoduje, że bardzo intensywnie poszukiwane są mechanizmy biofizyczne mogące leżeć u ich podstaw. Działanie pól magnetycznych na obiekty biologiczne zależy od własności magnetycznych tych obiektów. W najmniejszej ilości występują w nich substancje ferromagnetyczne, przede wszystkim magnetyt (Fe_3O_4), np. stwierdzono, że w 1 g tkanki mózgowej człowieka jest kilka milionów kryształów magnetytu na rozłożonych w $5 \cdot 10^5$ oddzielnych grupach (liczba komórek mózgu przekracza liczbę kryształów ponad stukrotnie) (25). Znacznie więcej niż ferromagnetyków spotyka się w organizmach żywych substancji paramagnetycznych, gdyż paramagnetykiem jest każdy atom czy jon mający niesparowane elektrony (słabe właściwości paramagnetyczne mają także wolne elektrony). Również wiele cząsteczek biologicznych, np. deoksyhemoglobina, jest paramagnetykami. Ferromagnetyki i paramagnetyki stanowią jednakże znikomą (choć ważną biologicznie) część organizmów żywych, w tym i człowieka. W skali makroskopowej organizmy żywe są diamagnetykami. Świadczy o tym lewitacja żaby w polu 16 T dokonana w 1996 r. w Nijmegen High Field Magnet Laboratory w Amsterdamie (26). Gdyby pole wytwarzane przez zawarte w żabie substancje ferromagnetyczne i paramagnetyczne było porównywalne z polem wytwarzanym w wyniku diamagnetyzmu, miałaby ona znaczne problemy z unoszeniem się, gdyż pola związane z ferromagnetyzmem i paramagnetyzmem mają przeciwny znak do pola wywoływanego przez diamagnetyzm.

Zjawiska fizyczne występujące w obiektach biologicznych, znajdujących się w polach magnetycznych można podzielić na:

a) związane z powstawaniem siły Lorentza (np. powstawanie siły elektromotorycznej w poruszających się przewodnikach, powstawanie siły działającej na poruszające się naładowane cząsteczki, działanie skręcające na stałe dipole magnetyczne i niesferyczne cząsteczki para- i diamagnetyczne, działanie translacyjne na stałe dipole magnetyczne i cząsteczki para- i diamagnetyczne);

b) działanie pól na stany spinowe elektronów.

Przykładem efektu biologicznego, związanego ze zjawiskami należącymi do grupy (a), jest indukowanie potencjałów w tętnicach na skutek przepływu krwi. Wykazano, że w aorcie o średnicy 0,025 m i prędkości przepływu krwi 0,63 m/s w polu magnetycznym powstaje potencjał równy 16 mV na 1 T. Potencjał taki, aż do poziomu kilku T, nie ma negatywnego wpływu nawet na tak wrażliwy organ, jak serce (27). Efekty związane ze zjawiskami z grupy (a) można obserwować także w układzie nerwowym. Również i w tym wypadku wykazano, że zaburzeń impulsów nerwowych, spowodowanych ich przepływem w zewnętrznym polu magnetycznym, można spodziewać się dla pól o wartościach indukcji rzędu kilka – kilkanaście tesli (27). Skręcenie wywoływane w dipolach magne-

tycznych, np. kryształach ferromagnetycznych i niesferycznych cząsteczkach para- lub diamagnetycznych, może prowadzić do zgodnej z kierunkiem pola orientacji, mających taką budowę cząsteczek biologicznych i do zaburzania reakcji, w których te cząsteczki biorą udział. Teoretycznie zjawisko to może również zmieniać prawdopodobieństwo wiązań poprzez zmianę orientacji molekuł posiadających moment magnetyczny (28). Jednak by miało ono praktyczne znaczenie, wymaga stosowania bardzo wysokich pól. Wykazano na przykład, że mierzone metodą dwójłomności skręcenie o 1% próbki DNA z komórek grasicy cielęcej, wymaga zastosowania zewnętrznego pola magnetycznego o indukcji 13 T (29). Z powyższego wynika, że u podstaw obserwowanych efektów zdrowotnych, powodowanych przez środowiskowe ekspozycje na pola magnetyczne, raczej nie mogą leżeć zjawiska związane z działaniem siły Lorentza na cząsteczki biologiczne, gdyż mogą one mieć znaczenie dopiero dla pól o wartościach kilku – kilkunastu tesli. Znaczne mniejsze wartości indukcji (od kilkudziesięciu mikrotesli) wymagane są, by spowodować wpływ pola magnetycznego na stany spinowe elektronów. Przypuszcza się, że zjawisko to może wpływać na reakcje biochemiczne, polegające na tworzeniu par rodników jako produktów przejściowych (30). Kiedy na skutek rozerwania wiązania chemicznego powstaje para rodników*, reakcja może przebiegać dwoma torami: 1) rekombinacji rodników lub 2) rozdzielenia pary; w tym drugim przypadku powstają wolne rodniki, mogące oddziaływać z molekułami ośrodka, w którym dyfundują. Wybór jednej z tych dróg zależy od wzajemnej orientacji niesparowanych spinów rodników. Zewnętrzne pole magnetyczne może tę wzajemną orientację zmieniać. Do procesów biochemicznych, zachodzących z udziałem par rodników, należą m.in. procesy oksydacyjne takie, jak peroksydacja lipidów czy oksydacyjne uszkadzanie DNA (a także ich procesy naprawcze). Jak dotychczas wykazano wpływ pól magnetycznych o stosunkowo niskich indukcjach (od kilkudziesięciu mikrotesli) na proces peroksydacji lipidów w sztucznych błonach fosfolipidowych (31,32) czy naturalnych błonach mikrosomalnych (33). Szczególne zainteresowanie budzą badania genotoksycznego działania sieciowych PEM (ze względu na związek takich uszkodzeń z procesem kancerogenezy). W latach 1990–2003 opublikowano 63 raporty na ten temat. Na ich podstawie trudno sformułować ostateczne wnioski, gdyż w 46% prac nie stwierdza się uszkodzeń materiału genetycznego pod wpływem ekspozycji, w 22% prac taki efekt stwierdzono, a wyniki 32% prac były niejednoznaczne (34). Ponieważ procesy oksydacyjne leżą u podstaw patogenezy wielu z chorób wiązanych z ekspozycją na sieciowe pola magnetyczne, więc uzasadnione wydają się być przypuszczenia, że wpływ pola magnetycznego na pary rodników może być jednym z mechanizmów biofizycznych prowadzących do negatywnych skutków zdrowotnych. Wydaje się jednak, że przy pomocy tej hipotezy nie da się wyjaśnić zwiększonego ryzyka zachorowania na nowotwory osób mieszkających w pobliżu linii elektroenergetycznych. Stwierdzono, że ryzyko to zwiększa się u osób eksponowanych na średnie dobowe pole magnetyczne o indukcji 0,3–0,4 μT (13,14), a tak niewielkie pole nie może wpływać na kinetykę rekombinacji par rodników. Innym kierunkiem w poszukiwaniu mechanizmów leżących u podstaw biologicznego działania słabych PEM jest analiza mechanizmów rezonansowego pochłaniania energii elektromagnetycznej. Pierwszym i najbardziej znanym jest mechanizm rezonansu cyklotronowego (35), który został opracowany do wyjaśnienia wyników doświadczeń nad wypływem jonów wapnia $^{45}Ca^{++}$ z tkanki mózgowej kurcząt. W stałym polu magnetycznym cząstka wykonuje w próżni ruch kołowy z prędkością kątową, zwaną częstotliwością cyklotronową. Jeżeli w takim układzie zostanie zastosowane PEM o częstotliwości cyklotronowej, to nastąpi rezonansowe przekazywanie energii pola do cząsteczki. Ponieważ w układach biologicznych jony (cząsteczki naładowane) przechodzą przez błony kanałami o kształcie spirali, ich zwiększona energia może skutkować zmianami w transporcie błonowym. Szczególnie interesujące jest zastosowanie teorii rezonansu cyklotronowego do warunków pola geomagnetycznego. Okazuje się, że dla 50 μT (pole ziemskie w średnich szerokościach geograficznych) częstotliwość cyklotronowa dla ważnych biologicznie jonów należy do zakresu ELF, np. dla Ca^{2+} wynosi 38,7 Hz, dla Na^{+} – 33,3 Hz, dla K^{+} – 19,6 Hz a dla Fe^{2+} – 27,9 Hz itd. Jakkolwiek za pomocą tego modelu udało się wyjaśnić szereg obserwacji eksperymentalnych związanych z transportem jonowym (36,37), jednakże spotyka się on także z krytyką. Podkreśla się, że taki ruch, jaki jest przewidywany przez model, nie jest możliwy w gęstym, płynnym środowisku układów biologicznych, w którym dominują zderzenia. Ponadto jony w środowisku biologicznym w normalnych warunkach są uwodnione, co powinno uwzględniać się przy obliczaniu częstotliwości rezonansowej (38).

Inną interpretację „rezonansu cyklotronowego" w układach biologicznych zaproponował Lednev (39).

* Rodnik to atom lub grupa atomów połączonych wiązaniami chemicznymi, zawierający jeden lub dwa elektrony niesparowane.

Dotyczy ona jonów słabo związanych z białkami, np. Ca^{2+} z kalmoduliną. Ruchy termiczne prowadzą do ciągłego rozrywania i tworzenia wiązania, tj. do przejść pomiędzy różnymi poziomami energii w kompleksie białko – jon. Taki układ można traktować jak naładowany oscylator o charakterystycznych częstotliwościach drgań własnych. PEM o takiej samej częstotliwości będzie pochłaniane w sposób rezonansowy. W układzie biologicznym przejawi się to zmianami tempa wiązania się Ca^{2+} z białkiem. Model Ledneva był sprawdzany doświadczalnie. Wyniki badań nie są jednoznaczne: w niektórych przewidywania teoretyczne zostały potwierdzone (40), w innych nie (41).

Kolejnym modelem rezonansowym jest model Zhadina i Fesenko (42). Dotyczy on, podobnie jak model Ledneva, jonów słabo związanych z cząsteczkami. W stałym polu magnetycznym jony te wykonują ruch precesyjny z częstotliwością Larmora dookoła kierunku wektora pola (jon zaczepiony jest w miejscu wiązania i ma dwa stopnie swobody). Jeżeli zostanie zastosowane zmienne pole magnetyczne o częstotliwości Larmora równoległe do pola stałego, to nastąpi rezonansowe przekazywanie energii z pola do jonu, co może doprowadzić do uszkodzenia wiązania. Jednakże obliczenia teoretyczne pokazują, że dla pól magnetycznych o wartościach indukcji występujących w środowisku człowieka, energia otrzymywana w ten sposób przez jony z pola jest tak niewielka, że aby uszkodzić nawet najsłabsze wiązanie, należałoby ją gromadzić przez całe lata (38).

Aby wyjaśnić wyniki doświadczeń nad wypływem jonów radioaktywnego wapnia $^{45}Ca^{2+}$ z eksponowanej na PEM tkanki mózgowej, zaproponowano również wykorzystanie zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) (43). Koncepcja ta ma dużo zalet, jednakże również – sporo wad. Do najważniejszych należy fakt, że w słabych stałych polach magnetycznych, takich jak pole ziemskie, stosunek energii dipola magnetycznego do energii cieplnej, eksponowanego obiektu biologicznego, jest kilka rzędów wielkości niższy niż analogiczna wielkość dla jąder wodoru, wykorzystywanych w obrazowaniu przy użyciu NMR – nie wiadomo więc, czy zjawisko to może mieć jakiekolwiek znaczenie biologiczne. Ponadto zachodzi ono jedynie dla atomów z niezerowym spinem jądrowym. Wiele ważnych biologicznie pierwiastków, np. ^{12}C, ^{16}O, ^{56}Fe, ^{24}Mg, ^{32}S czy ^{40}Ca (ten ostatni izotop stanowi ponad 97% całego Ca występującego w przyrodzie) ma zerowy spin jądrowy, więc nie należy spodziewać się dla nich występowania mechanizmu NMR.

Jak wspomniano wyżej, w obiektach biologicznych, w tym w organizmie człowieka, występują substancje ferromagnetyczne, na które w zmiennych polach magnetycznych działają oscylacyjne siły magnetomechaniczne i skręcenia. Kirschvink i wsp. zaproponowali model, w którym oscylacyjne siły magnetyczne z zakresu ELF powodują otwieranie i zamykanie wrażliwych na ciśnienie kanałów jonowych w błonach biologicznych (44). Z ich obliczeń wynika, że ten mechanizm dla pola o częstotliwości 60 Hz może mieć znaczenie już przy indukcjach około 0,1 mT. Jednak ze względu na bardzo małą liczbę kryształów ferromagnetycznych w organizmie człowieka, biologiczne znaczenie tego mechanizmu może budzić wątpliwości.

Analiza danych literaturowych na temat efektów biologicznych ekspozycji na PEM świadczy o tym, że bardzo istotną rolę odgrywa przy tym modulacja działającego pola. Pokazano na przykład, że niemodulowane PEM o wysokich częstotliwościach nie wpływa na wypływ jonów wapnia z tkanki mózgowej kurcząt, natomiast takie samo pole modulowane amplitudowo z częstotliwością rezonansową taki wpływ wykazuje (45). Istnieje również wiele danych doświadczalnych pokazujących, że zmienne pola elektryczne, indukowane w komórkach i tkankach przez impulsowe pola magnetyczne, mają działanie biologiczne, np. powodują stymulację wzrostu kości, mają wpływ na podziały komórkowe, transport jonowy czy syntezę DNA, RNA i białek (27). Przypuszcza się, że jest to spowodowane kształtem działającego pola. Ponieważ

$$j=\frac{\sigma r}{2}\frac{dB}{dt},$$

gdzie:

j – gęstość prądu (A/m^2),

σ – przewodność tkanki (S/m),

r – promień pętli prądu,

dB/dt – szybkość zmian indukcji magnetycznej,

więc im krótszy czas narastania i zanikania pola, tym większa jest gęstość prądu.

POLA ELEKTROMAGNETYCZNE WYSOKICH CZĘSTOTLIWOŚCI

Jeżeli do oceny badań efektów biologicznych ekspozycji na PEM wysokich częstotliwości (w.cz) zastosować wyżej wspomniane kryteria uznawania badań za wiarygodne, to trzeba stwierdzić, że dotychczas nie ma potwierdzonych dowodów na ich negatywny wpływ na zdrowie. Nie oznacza to oczywiście, że nie ma pojedynczych doniesień na ten temat.

W zakresie radiofal, czyli PEM o częstotliwościach od 0,1–300 MHz zaobserwowano zaburzenia funkcjonowania układu krążenia (u pracowników stacji nadawczych średniofalowych 1 MHz (46) i u fizykoterapeutów stosujących diatermie krótkofalowe 27 MHz (47)), zaburzenia neurologiczne i negatywny wpływ na narząd wzroku (u pracowników stosujących zgrzewarki dielektryczne 27 MHz (48,49) oraz u monterów instalujących i konserwujących nadajniki radiowe i telewizyjne (powyżej 500 kHz) (50)). Zaobserwowano również wzrost ryzyka białaczki u radioamatorów (51).

Badania zdrowotnych skutków ekspozycji na mikrofale (300 MHz–300 GHz) przeżywają od kilku lat renesans w związku z pojawieniem się i burzliwym rozwojem telefonii komórkowej (w Polsce w tej chwili zainstalowane są systemy pracujące z częstotliwościami w pasmach 450 MHz, 900 MHz, 1800 MHz i 2000 MHz). Do tego czasu obserwacje negatywnych skutków ekspozycji na mikrofale o wartościach gęstości mocy występujących w praktyce były stosunkowo rzadkie. Do najciekawszych należały dane, wskazujące na możliwość wzrostu ryzyka zachorowania na nowotwory personelu wojsk radiolokacyjnych (52), czy większa liczba zmian w soczewkach pracowników zawodów mikrofalowych (53,54).

Przed przystąpieniem do omówienia wyników badań wpływu telefonii komórkowej na zdrowie człowieka należy przypomnieć, że telefonia komórkowa składa się z dwóch podstawowych elementów: telefonów (terminali) doręcznych i stacji bazowych. Charakter ekspozycji na PEM, powodowany przez oba te elementy, jest zupełnie różny – terminale doręczne emitują stosunkowo silne PEM głównie w czasie rozmowy a pola te działają przede wszystkim na głowę, natomiast PEM emitowane przez stacje bazowe są, w miejscach przebywania ludzi, bardzo słabe (setki razy mniejsze niż PEM telefonów doręcznych). Pola te działają na całe ciało człowieka a ekspozycja jest ciągła. W związku z tym, konieczne jest prowadzenie odrębnych badań dla każdego z elementów systemu.

W badaniach zdrowotnych skutków ekspozycji na PEM, emitowane przez terminale doręczne, szczególne miejsce zajmują badania działania rakotwórczego. Ich wyniki są wciąż niejednoznaczne. Coraz więcej danych wskazuje na możliwość kancerogennego działania PEM emitowanych przez telefony 1G (pierwszej generacji), czyli analogowe (wykorzystujące głównie modulację częstotliwości i fazy). W szwedzkich badaniach przeprowadzonych na grupie 1429 przypadków i 1470 osób z grupy kontrolnej stwierdzono, że ryzyko nowotworów głowy u osób używających analogowych telefonów komórkowych wzrasta (OR = 1,3), przy czym wzrost ten jest znacznie większy, jeżeli okres używania telefonów wynosi ponad 10 lat (OR = 1,8). Spośród wszystkich nowotworów największy wzrost ryzyka obserwowano dla nerwiaka nerwu słuchowego (OR = 3,5) (55). Również w badaniach Lonna i wsp. (56), przeprowadzonych na grupie 148 przypadków i 604 osobach z grupy kontrolnej, stwierdzono, że ryzyko wystąpienia nerwiaka nerwu słuchowego u osób używających analogowych telefonów komórkowych, wzrasta po 10 latach ich użytkowania (OR = 1,9), przy czym wzrost ten jest znacznie większy dla nowotworów umiejscowionych po tej stronie głowy, do której jest przystawiany telefon (OR = 3,9). Jak dotychczas nie obserwowano podobnych konsekwencji stosowania telefonów cyfrowych. Co więcej, w jednym z ostatnich raportów stwierdza się, że u użytkowników telefonów komórkowych nie występuje zwiększone ryzyko zachorowania na nowotwory, a wprost przeciwnie – u tzw. „regularnych użytkowników" obserwuje się mniej agresywnych guzów i są one mniejsze niż w grupie osób nieużywających telefonów komórkowych (użytkownicy mieli o połowę mniej glejaków wysokiego stopnia złośliwości i były one o 25% mniejsze) (57).

Spośród wszystkich badań, zdecydowana przewaga obserwacji, potwierdzających wpływ PEM na zdrowie człowieka, dotyczy jedynie funkcji ośrodkowego układu nerwowego. Między innymi w badaniu epidemiologicznym, wykonanym w Szwecji i Norwegii (12 000 badanych w Szwecji i 5000 w Norwegii), stwierdzono, że 31% osób badanych w Norwegii i 13% w Szwecji podawało występowanie przynajmniej jednego symptomu kojarzonego z telefonem komórkowym (uczucie ciepła w okolicy ucha, ból głowy, pieczenie skóry, zawroty głowy, uczucie zmęczenia, uczucie dyskomfortu). Na podstawie wyników badań autorzy sugerują związek pomiędzy częstotliwością i długością rozmów a podawanymi symptomami (58). W kilku badaniach stwierdzono wpływ PEM telefonów komórkowych na EEG podczas wykonywania skomplikowanych zadań (takiego efektu nie było w EEG spoczynkowym lub podczas wykonywania prostych zadań) (59,60). Zaobserwowano również wpływ PEM 900 MHz emitowanego przez telefon komórkowy na funkcje poznawcze i pamięć operacyjną (roboczą) człowieka (48 ochotników). Stwierdzono przyspieszenie czasu odpowiedzi w reakcji prostej i zadaniach mierzących czujność oraz skrócenie czasu potrzebnego do wykonania zadań arytmetycznych. Według autorów świadczy to, że takie PEM ułatwiają pracę mózgu, zwłaszcza przy zadaniach wymagających uwagi i manipulowania informacjami

w pamięci operacyjnej (61). W związku z działaniem PEM telefonów komórkowych na głowę uzasadnione jest podejrzenie, że mogą one zaburzać inne neurologicznie sterowane funkcje fizjologiczne, np. rytm serca czy ciśnienie krwi. Istnieją już dane eksperymentalne potwierdzające tę hipotezę, np. stwierdzono niewielki wzrost ciśnienia tętniczego krwi (5–10 mmHg) i obniżenie tętna po 35 minutach ekspozycji (62).

Z danych uzyskanych od operatorów telefonii komórkowej w Polsce wynika, że budowa prawie połowy stacji bazowych spotkała się z protestami mieszkańców okolicznych domów. Jako główna przyczyna protestów podawana jest obawa o zdrowie. W związku z tym, od kilku lat prowadzone są na świecie badania mające na celu ocenę wpływu na zdrowie PEM, emitowanego przez stacje bazowe telefonii komórkowej. Są to przede wszystkim badania ankietowe. Ich wyniki wskazują, że u mieszkańców okolic stacji bazowych, występują różnego rodzaju dolegliwości, przede wszystkim związane z układem krążenia oraz kłopoty ze snem (63–65). Częstość ich występowania była istotnie zależna od poziomu ekspozycji (najczęściej korelowanego z odległością od stacji). Jednak w chwili obecnej nie można jednoznacznie uznać wpływu PEM stacji bazowych na zdrowie okolicznych mieszkańców za udowodniony. Z części badań wynika, że występowanie subiektywnych dolegliwości jest bardziej skorelowane z indywidualnym poziomem obaw badanych przed negatywnymi skutkami ekspozycji na PEM czy z ilością sprzętu gospodarstwa domowego, emitującego PEM (np. komputerów) niż z odległością od stacji. Wydaje się więc, że konieczne są dalsze badania nie tylko ankietowe, ale także kliniczne, które pozwolą wyjaśnić podłoże zgłaszanych dolegliwości. Takie badania są prowadzone również w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi.

Przez wiele lat uważano, że jedynym mechanizmem, prowadzącym do znaczących efektów biologicznych ekspozycji na PEM w.cz., jest mechanizm termiczny (czyli zamiana energii elektromagnetycznej na energię cieplną). U jego podłoża leżą procesy relaksacyjne, powodowane obrotami molekuł polarnych (mających trwały i indukowany elektryczny moment dipolowy, takich jak woda, aminokwasy, białka i lipidy) w zmiennym polu elektrycznym, polaryzacja ładunków na strukturach dwuściennych, wywołana ich niejednorodnością (np. na błonach komórkowych) i zjawisko przewodzenia jonowego. Na skutek działania układu termoregulacyjnego człowieka, pochłanianie energii elektromagnetycznej w jego ciele nie musi powodować proporcjonalnego wzrostu temperatury. Duże znaczenie dla tych oddziaływań mogą mieć również szybkie tempo ogrzewania i niejednorodne rozkłady przestrzenne pochłanianej energii.

Opinia o termicznym podłożu wszystkich efektów biologicznych opierała się na analizie energii kwantu PEM w.cz. Jest ona bardzo mała, np. dla PEM o częstotliwości 900 MHz wynosi 4 μeV, a dla 1,8 GHz – 7 μeV, podczas gdy do zerwania najsłabszego wiązania w cząsteczce DNA potrzebna jest energia około 1 eV. Ponieważ podobne energie potrzebne są do wywoływania uszkodzeń w innych biomolekułach, więc w zasadzie PEM w.cz. nie powinno wywoływać znaczących efektów biologicznych. Wskazywano również na fakt, że wpływ energii PEM jest całkowicie maskowany przez energię tzw. szumu termicznego, która dla temperatury $\tau = 300^{\circ}K$ (temperatura ciała człowieka) wynosi około 26 meV. Rzeczywiście, różne rozpatrywane mechanizmy dają stosunkowo wysokie wartości progowe PEM, dla których mogą wystąpić znaczące efekty biologiczne, np. w oparciu o model dipolowy komórki (pod wpływem pola elektrycznego komórka staje się dipolem elektrycznym) wyznaczono ten próg na około 300 V/m dla PEM o częstotliwości 100 MHz, natomiast dla modelu opracowanego w oparciu o przepływ prądów przez błonę komórkową – na ponad 200 V/m (66). Jednak pokazano, że istnieją zjawiska o podłożu termicznym występujące dla niewielkich przyrostów temperatury, np. mikrofalowy efekt słuchowy występuje przy przyroście temperatury rzędu $5 \cdot 10^{-6}\,^{\circ}C$ (67).

Należy jednak pamiętać, że „termiczne" podejście do mechanizmów efektów biologicznych nie ma zastosowania przy rezonansowym przekazywaniu energii. Wśród modeli rezonansowych szczególne zainteresowanie budzi model opracowany przez Frőhlicha (68). Według niego duże molekuły lub części składowe tkanek wykonują mechaniczne drgania o określonych częstotliwościach. Zadziałanie polem o takiej samej częstotliwości powoduje rezonansowe pochłanianie energii (na zasadzie podobnej do odbiornika radiowego). Niektórzy autorzy sugerują, że do takich struktur należą polimery DNA i części składowe struktur podporowych komórki (69,70).

Wydaje się, że do wyjaśniania zjawisk występujących przy ekspozycji na PEM w.cz. należy poważnie rozważyć możliwość wykorzystania mechanizmu rezonansu cyklotronowego. Jak wspomniano wyżej, wypływ jonów wapnia z tkanki mózgowej ma taki sam charakter dla ekspozycji na pola ELF, jak i na pola w.cz modulowane amplitudowo z częstotliwością z zakresu

ELF (45), a błona komórkowa pełni rolę filtra górnoprzepustowego, jest więc „wrażliwa" na różnice potencjału związane z modulacją, a nie sygnałem nośnym.

Innym mechanizmem rozważanym przy wyjaśnianiu zjawisk występujących w polach stałych i wolnozmiennych, a mogącym mieć zastosowanie również dla PEM w.cz. jest ich działanie na stany spinowe par rodników. Polega ono na zmianie wzajemnej konfiguracji niesparowanych elektronów w parze rodników, czyli przejścia pomiędzy ich stanami spinowymi. Potrzebna jest do tego energia. W przypadku pola stałego lub wolnozmiennego była ona dostarczana przez pole magnetyczne. Wydaje się jednak, że może ona być dostarczana również przez promieniowanie mikrofalowe. Pochłonięcie kwantu o energii 3,9 μeV (jest to energia kwantu promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwości 930 MHz) jest równoważne energii zawartej w polu magnetycznym o indukcji ponad 30 mT. Jak wspomniano wcześniej, przy użyciu modelu wpływu na pary rodników wyjaśnia się obserwacje, dotyczące działania pola magnetycznego na procesy biochemiczne, zachodzące z tworzeniem par rodników, w tym procesy oksydacyjne. Wpływ na te procesy wykazują również PEM z zakresu mikrofalowego, w tym emitowane przez telefony komórkowe. Lai i Singh wykazali na przykład, że dwugodzinna ekspozycja szczurów na ciągłe PEM o częstotliwości 2450 MHz, powodująca średni SAR = 1,2 W/kg, istotnie zwiększa liczbę uszkodzeń pojedynczych nici DNA w komórkach mózgu. (71). Również inni autorzy stwierdzili uszkodzenia DNA w komórkach, powodowane mikrofalami (zarówno ciągłymi jak i impulsowymi) (72,73). Istnieje także kilka prac wskazujących na istotny wpływ mikrofal na procesy, w których ważną rolę odgrywają wolne rodniki (74–80). Także badania Instytutu Medycyny Pracy, dotyczące wpływu ekspozycji na ciągłe PEM o częstotliwości 930 MHz (fala nośna sygnału telefonii komórkowej) i gęstości mocy 5 W/m^2 (wielkość PEM w pobliżu telefonu w trakcie prowadzenia rozmowy) na wytwarzanie reaktywnych form tlenu w limfocytach szczurzych *in vitro*, potwierdzają możliwość zastosowania mechanizmu wpływu PEM na pary rodników do wyjaśnienia uzyskanych wyników (81).

PODSUMOWANIE

Z tego, z konieczności krótkiego i dalece niepełnego przeglądu danych na temat zdrowotnych skutków ekspozycji na PEM i fizycznych mechanizmów mogących leżeć u ich podłoża, wynika, że:

1) W chwili obecnej nie ma wystarczających dowodów na uznanie tego czynnika za szkodliwy (może poza związkiem magnetycznego pola sieciowego z niektórymi nowotworami, a zwłaszcza białaczkami u dzieci). Nie oznacza to jednak, że można zaprzestać prac w tej dziedzinie. Duża liczba niekiedy pojedynczych obserwacji skłania wręcz do ich zintensyfikowania.

2) Energie zawarte w PEM zakresu 0–300 GHz są zbyt małe, by mogły istotnie bezpośrednio wpływać na reakcje biochemiczne zachodzące w organizmach żywych. Istnieje jednak szereg hipotetycznych mechanizmów wpływu na obiekty biologiczne, które zachodzą dla PEM o wartościach spotykanych w praktyce higienicznej. Dotyczy to zwłaszcza mechanizmów rezonansowego przekazywania energii.

3) Przy analizie działania pól elektrycznych niskich częstotliwości należy pamiętać, że ze względu na bardzo niejednorodną budowę tkanek, istnieje możliwość indukowania w niektórych ich strukturach pól o stosunkowo dużych wartościach, mogących mieć znaczenie biologiczne. Takimi strukturami są zwłaszcza błony komórkowe.

4) Nie istnieje dotychczas żadna hipoteza wyjaśniająca zadowalająco mechanizm działania kancerogennego sieciowych pól magnetycznych. Proponowane mechanizmy dotyczą pól o indukcjach znacznie wyższych niż występujące w środowisku człowieka.

5) Działanie nietermiczne PEM w.cz. również nie ma w chwili obecnej silnego uzasadnienia biofizycznego. Istniejące hipotezy na temat mechanizmów takiego działania wymagają uściślenia i potwierdzenia doświadczalnego.

PIŚMIENNICTWO

1. EMF Database Covering Electromagnetic Field Biological and Health Effects. Information Ventures [cytowany 30 sierpnia 2005]. Adres: http://infoventures.com/emf/database/emfdbA.html
2. Knowledge-Based Literature Database on the Effects of Electro-Magnetic Fields on the Organism (WBLDB) [cytowany 30 sierpnia 2005]. Adres: http://wbldb.femu.rwth-aachen.de
3. The International EMF Project, Project database [cytowany 30 sierpnia 2005]. World Health Organisation, Geneva. Adres: http://www.who.int/peh-emf/emfstudies/database.cfm
4. Kaune W.T., Phillips R.D.: Comparison of the coupling of grounded humans, swine, and rats to vertical 60-Hz electric fields. Bioelectromagnetics, 1980;1(2):117–130
5. Dawson T.W., Caputa K., Stuchly M.: Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60-Hz magnetic fields. Bioelectromagnetics, 1997;18(7):478–490
6. Portier C.J., Wolfe M.S. [red.]: Assessment of helth effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. Working Group Report, 1998

7. Pohl H.A.: Cellular spin resonance, a new method for determining the dielectric properties of living cells. Int. J. Quantum Chem., 1983;10:161
8. Noji H., Yasuda R., Yoshida M., Kinosita K.: Direct observation of the rotation of F_1-ATPase. Nature, 1997;386:299–302
9. Bernhardt J.H.: The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. Radiat. Environ. Biophys., 1988;27(1):1–27
10. Wertheimer N., Leeper E.: Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am. J. Epidemiol., 1979;109:273–284
11. Milham S.: Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields [list do redakcji]. N. Engl. J. Med., 1982;307(4):249
12. Ahlbom A., Cordis E., Green A., Linet M., Savitz D., Swerdlow A.: Review of the epidemiologic literature on EMF and health. Environ. Health Perspect, 2001;109 (Supl. 6):911–933
13. Ahlbom A., Day N., Feychting M., Roman E., Skinner J., Dockerty J. i wsp.: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br. J. Cancer, 2000;83(5):692–698
14. Greenland S., Sheppard A.R., Kaune W.Y., Poole C., Kelsh M.A.: A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group. Epidemiology, 2000;11(6):624–634
15. Savitz D.A., Checkoway H., Loomis D.P.: Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. Epidemiology, 1998;9(4):398–404
16. Sobel E., Dunn M., Davanipour Z., Qian Z., Chui H.C.: Elevated risk of Altzheimer's disease among workers with likely electromagnetic field exposure. Neurology, 1996;47(6):1477–1481
17. Beale I.L., Pearce N.E., Conroy D.M., Henning M.A., Murrell K.A.: Physiological effects of chronic exposure to 50 Hz magnetic fields in human living near extra-high-voltage transmission lines. Bioelectromagnetics, 1997;18(8):584–594
18. Savitz D.A., Liao D., Sastre A., Kleckner R.C., Kavet R.: Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. Am. J. Epidemiol., 1999;149(2):135–142
19. Bortkiewicz A., Zmyślony M., Gadzicka E.: Ekspozycja na pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz a zmiany w układzie krążenia u pracowników stacji elektroenergetycznych. Med. Pr., 1998;49(3):263–268
20. Sastre A., Cook M.R., Graham C.: Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm. Bioelectromagnetics, 1998;19(2):98–106
21. Juutilainen J., Matilainen P., Saarikoski S., Laara E., Suonio S.: Early pregnancy loss and exposure to 50-Hz magnetic fields. Bioelectromagnetics, 1993;14(3):229–236
22. Siedlecka J., Makowiec-Dąbrowska T., Zmyślony M.: Ryzyko nieprawidlowego wyniku ciąży u szwaczek a środowisko pracy ze szczególnym uwzględnieniem pola magnetycznego emitowanego przez przemysłowe maszyny szwalnicze. Sprawozdanie z realizacji tematu IMP 20.4. Instytut Medycyny Pracy, Łódź 1999 [praca niepublikowana]
23. Knave B., Gamberale F., Bergstrom S., Brike E., Iregren A., Kolmodin-Hedman B. i wsp.: Long-term exposure to electric fields: a cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high voltage substations. Scand. J. Work Environ. Health, 1979;5(2):115–125
24. Nordstrom S., Birke E., Gustavsson L.: Reproductive hazards among workers at high voltage substations. Bioelectromagnetics, 1983;4(1):91–101
25. Tenforde T.S.: Cellular and molecular pathways of extremely low frequency electromagnetic field interactions with living systems. W: Blank M. [red.]. Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. San Francisco Press, Inc., San Francisco 1993
26. Berry M.V., Geim A.K.: Of flaying frogs and levitrons. Eur. J. Phys., 1997;18:307–313
27. WHO Environmental Health Criteria 69. Magnetic Fields. World Health Oorganization, Genewa 1987
28. Gross L.: Distortion of the bond angle in a magnetic field and its possible magnetobiological implications. W: Barnothy M.F. [red.]. Biological Effects of Magnetic Fields. Plenum Press, New York 1964, ss. 74–79
29. Maret G., Dransfeld K.: Macromolecules and membranes in high magnetic fields. Physica, 1977;86-88B:1077–1083
30. McLauchlan K.A., Steiner U.E.: The spin correlated radical pair as a reaction intermediate. Mol. Phys., 1991;73(2):241–263
31. Aristarkhov V.M., Klimenko L.L., Deev A.I., Ivanekha E.V.: Effects of constant magnetic field on peroxide oxidation of lipid in phospholipid membranes. Biofizika, 1983;5:800–806
32. Lalo U.V., Pankratov Y.O., Mikhailik O.M.: Steady magnetic fields effects on lipid peroxidation kinetics. Redox Report, 1994;1:71–75
33. Zmyślony M., Jajte J., Rajkowska E., Szmigielski S.: Weak (5 mT) static magnetic field stimulates lipid peroxidation in isolated rat liver microsomes *in vitro*. Electromagnetobiol., 1998;17(2):109–113
34. Vijayalaxmi, Obe G.: Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electromagnetic radiation: A review and future research recommendations. Bioelectromagnetics, 2005;26(5):412–430
35. Liboff A.R.: Geomagnetic cyclotron resonance in living cells. J. Biol. Phys., 1985;13:99
36. Liboff A.R., Rozek R.J., Sherman M.L., McLeod B.R., Smith S.D.: $^{45}Ca^{++}$ cyclotron resonace in human lymphocytes. J. Bioelectr., 1987;6(1):13–22
37. Smith S.D., McLeod B.R., Liboff A.R., Cooksey K.: Calcium cyclotron resonance and diatom mobility. Bioelectromagnetics, 1987;8(3):215–227
38. Polk C.: Dosimetric extrapolation of extremely-low frequency electric and magnetic fields across biological systems. Bioelectromagnetic, 1992; Supl. 1:205–208
39. Lednev V.V.: Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. Bioelectromagnetics, 1991;12(2):71–75
40. Shuvalova L.A., Ostrovskaja M.V., Sosunov E.A., Lednev V.V.: The effect of a weak magnetic field in the paramagnetic resonance mode on the rate of the calmodulin-dependent phosphorylation of myosin in solution. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1991;317(1):227–230
41. Bruckner-Lea C., Durney C.H., Janata J., Rappaport C., Kaminski M.: Calcium binding to metallochromic dyes and calmodulin

in the presence of combined AC-DC magnetic fields. Bioelectromagnetics, 1992;13(2):147–162
42. Zhadin M.N., Fesenko E.E.: Ion cyclotron resonance in biomolecules. Biomed. Sci., 1990;1(3):245–250
43. Blackman C.F., Benane S.G., Elliot D.J., House D.E., Pollock M.M.: Influence of electromagnetic fields on the efflux of calcium ions from brain tissue *in vitro*: A three model analysis consistent with the frequency response up to 510 Hz. Bioelectromagnetics, 1988;9(3):215–227
44. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Diaz-Ricci J.C., Kirschvink S.J.: Magnetite in human tissues: A mechanism for the biological effects of weak elf magnetic fields. Bioelectromagnetics, 1992;Supl. 1:101–113
45. Blackman C.F., Elder J.A., Weil C.M., Benane S.G., Eichinger D.C., House D.E.: Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radio frequency radiation: Effects of modulation frequency and field strength. Radio Sci., 1979;14:93–98
46. Bortkiewicz A, Gadzicka E., Zmyślony M.: Heart rate variability in workers exposed to medium-frequency electromagnetic fields. J. Auton. Nerv. Syst., 1996;59(3):90–97
47. Hamburger J.N. Logue P.M. Silverman: Occupational exposure to non-ionizing radiation and an association with heart disease: An exploratory study. J. Chron. Dis., 1983;36(11):791–802
48. Bini M.G., Checcucci A., Ignesti A., Millanta L., Olmi R., Rubino N. i wsp.: Exposure of workers to intense RF electric fields that leak from plastic sealers. J. Microw. Power, 1986;21(1):33–40
49. Kolmodin-Hedman B., Mild H.K., Jonsson E., Andersson M.C., Eriksson A.: Health problems among operators of plastic welding machines and exposure to radiofrequency electromagnetic fields. Ind. Arch. Occup. Environ. Health, 1988;60(4):243–247
50. Hollows F.C., Douglas J.B.: Microwave cataract in radiolinemen and controls. Lancet, 1984;2(8399):406–407
51. Milham S.: Silent Keys: leukaemia mortality in amateur radio operators. Lancet, 1985;1(8432):812
52. Szmigielski S., Bielec M., Lipski S., Sokolska G.: Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. W: Marino A.A.[red.]. Modern Bioelectricity. Marcel Dekker Inc., New York 1988, ss. 861–925
53. Cleary S.F., Pasternack B.S.: Cataract incidence in radar workers. Arch. Environ. Health, 1965;11(2):179–182
54. Majewska K.: Investigations on the effect of microwaves on the eye. Pol. Med. J., 1968;7(4):989–994
55. Hardell L., Mild K.H., Carlberg M.: Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. Int. J. Oncol., 2003;22(2):399–407
56. Lonn S, Ahlbom A, Hall P, Feychting M: Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. Epidemiology, 2004;15(6):653–659
57. Christensen H.C., Schüz J., Kosteljanetz M., Poulsen H.S., DMSc, Boice J.D., McLaughlin J.K. i wsp.: Cellular telephones and risk for brain tumors. A population-based, incident case-control study. Neurology, 2005;64:1189–1195
58. Oftedal G., Wilen J., Sandstrom M., Mild K.H.: Symptoms experienced in connection with mobile phone use. Occup. Med. (Oxford), 2000;50(4):237–245
59. Freude G., Ullsperger P., Eggert S., Ruppe I.: Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. Eur. J. Appl. Physiol., 2000;81(1–2):18–27
60. Krause C.M., Sillanmaki L., Koivisto M., Haggqvist A., Saarela C., Revonsuo A. i wsp.: Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during a memory task. Neuroreport, 2000;11(4):761–764
61. Koivisto M., Revensuo A., Krause C., Haarala C., Sillanmaki L., Laine M. i wsp.: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. Neuroreport, 2000;11(2):413–415
62. Braune S., Wrocklage C., Raczek J., Gailus T., Lücking C.H.: Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field. Lancet, 1998;351(9119):1857–1858
63. Moser M., Roosli M.: Epidemiological Studies on Mobile Phone base Stations and Health Possible Biological Outcomes and Study Designs. Cost 281 Workshop in Dublin, Mobile Phone base Stations and Health, 15–16 maja, 2003
64. Santini R., Santini P., Le Ruz P., Danze J.M., Seigne M.: Survey study of people living in the vicinity of cellular phone base stations. Electromagnetic Biol. Med., 2003;22(1):41–49
65. Hutter H.P., Moshammer H., Kundi M.: Mobile Telephone base--stations. Effects on health and wellbeing. W: Kostarakis P. [red.]. Biological Effects of EMFs Proceedings of 2nd International Workshop, Greece, 7–11 października 2002
66. Adair R.K.: Effects of weak high-frequency electromagnetic fields on biological systems. W: Klauenberg B.J., Grandolfo M., Erwin D.N. [red.]. Radiofrequency Radiation Standards. Plenum Press, New York 1994, s. 207
67. Guy A.W., Chou C.K., Lin J.C., Christensen D.,, Microwave-induced effects in mammalian auditory systems and physical materials. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1975;247:194–218
68. Fröhlich H.: The biological effects of microwaves and related questions. Adv. Electronics Electron. Phys., 1980;53:85
69. Kohli M., Mei W.N., Prohofsky E.W., Van Zandt L.L.: Calculated microwave absorption of double-helical. Biconformation poly(dG).poly(dC). Biopolymers, 1981;20(4):853–864
70. Davis M.E., Van Zandt L.L.: Microwave response of DNA in solution: Theory. Phys. Rev. A., 1988;37(3):888–901
71. Lai H., Singh N.P.: Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. Bioelectromagnetics, 1995;16(3):207–210
72. Philips J.L., Ivaschuk O., Ishida-Jones T., Jones R., Campbell-Beachler M., Haggren W.: DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency field *in vitro*. Bioelectroch Bioener, 1998;45:103–110
73. Sarkar S., Ali S., Behari J.: Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. Mutat. Res., 1994;320(1--2):141–147
74. Akoev I.G., Pashovkina M.S., Dolgacheva L.P., Semenova T.P., Kalmykov V.L.: Enzymatic activity of some tissues and blood serum from animals and humans exposed to microwaves and hypothesis on the possible role of free radical processes in the nonlinear effects and modification of emotional behaviour of animals. Radiats. Biol. Radioecol., 2002;42(3):322–330