

DOROTA STANIAK, KRZYSZTOF SOKOŁOWSKI, PIOTR MAJCHER

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego wielkiej częstotliwości na organizmy żywe

High frequency electromagnetic field affecting living organism

Streszczenie

Pole elektromagnetyczne (PEM) to przestrzeń, w której energia elektryczna i magnetyczna przenikają się wzajemnie. Towarzyszy nam praktycznie w każdej dziedzinie życia. Naturalne pole elektromagnetyczne jest wytwarzane przez Słońce i Ziemię, natomiast sztucznie powstaje jako efekt obecnej cywilizacji. Coraz większy rozwój techniki dostarcza z każdym rokiem nowych źródeł PEM. Spośród najbardziej rozpowszechnionych są linie przesyłowe zasilające większość urządzeń domowego użytku. Sprzęty te są źródłem głównie pól częstotliwości 50/60 Hz. Niektóre urządzenia domowe jak telewizory czy radia emitują promieniowanie z zakresu wyższych częstotliwości. Powszechnie używane obecnie kuchenki mikrofalowe czy telefony komórkowe pracują w zakresie mikrofalowym, czyli częstotliwości powyżej 300MHz. Pole elektryczne wysokiej częstotliwości ma także zastosowanie w medycynie, jako diatermia krótkofalowa, mikrofalowa czy prądy d'Arsonvala i są stosowane do leczenia wielu schorzeń ortopedycznych, reumatycznych czy mięśniowych.

Emitowane z wszechobecnych źródeł PEM oddziałuje na organizmy żywe. Nie jest do końca wyjaśniony mechanizm tych działań ani też jego szkodliwość. Wiadomo jest, iż pole elektromagnetyczne działające na organizm może wpływać na większość procesów metabolicznych komórek zaburzając ich pracę i funkcjonowanie. Promieniowanie z zakresu wyższych częstotliwości powoduje przegrzanie tkanek, co skutkuje wywołaniem efektu termicznego (hipertermii) i wszelkich reakcji stresowych dla organizmu. Istnieją także doniesienia, iż długotrwała ekspozycja na PEM powoduje rozwój choroby nowotworowej. Jednak wyniki badań na ten temat nie są jednoznaczne.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, ryzyko zdrowotne

Summary

Electromagnetic field (EMF) is the area in which penetration of electric and magnetic energy is mutual. It is taking part in practically every field of our life. Natural electromagnetic field is produced by The Sun or The Earth, however artificially it comes into being as an effect of present civilization. Every year development of the technology delivers new EMF's sources increasingly. Among the most widespread are transmission lines, which boosting majority of home devices. These devices are mostly sources of 50/60 Hz electromagnetic fields. Some of them like television or radio emit radiation with higher frequency. Universally used at present microwave cookers or cellular telephones work in microwave range, that is frequencies above 300MHz. High frequency electric field has found use in medicine, as a short-wave diathermy, microwave diathermy or d'Arsonval's electricity, applied to many orthopedic, rheumatic or muscular diseases treatment.

EMF emitted from ubiquitous sources affects living organisms. Mechanisms of this interactions and its harmful effect is not totally known. It is known that electromagnetic field can affect metabolic processes in cells and disturb their working and functioning. High frequency radiation range can lead to overheat tissues, which cause thermal effect (the hyperthermia) and every stress reactions for organism. There are some coverages that long-term exposition on EMF causes the development of neoplastic disease. However investigations in this subject are not unambiguous.

Key words: electromagnetic field, health risk.

CHARAKTERYSTYKA FIZYKALNA PEM

Pole elektromagnetyczne (PEM) towarzyszy nam od początku naszego istnienia i jest obecne w każdej dziedzinie życia. Obecnie trudno wyobrazić sobie brak elektryczności czy urządzeń elektrycznych, trudno jest obyć się bez Internetu i telefonu komórkowego. Jednak pole EM występowało już znacznie wcześniej. Naturalnym źródłem pola elektromagnetycznego jest Kosmos, Słońce i Ziemia oraz zjawiska z nimi związane, jak choćby wyładowania atmosferyczne czy prądy i pływy morskie [1]. Czym więc jest pole elektromagnetyczne? Jest to przestrzeń, w której rozchodzi się energia elektromagnetyczna. Siła w obrębie pola działa na odległość. Im bliżej znajdujemy się źródła PEM tym oddziaływanie na organizm jest większe. Pod względem fizycznym pole elektromagnetyczne ma dwie składowe: elektryczną oraz magnetyczną [2,3].

Obie składowe są zależne od siebie i określa je prawo Maxwella. Prawo to mówi o tym, iż każdej zmianie pola elektrycznego towarzyszy powstanie wirowego pola magnetycznego, a także przy każdej zmianie pola magnetycznego powstaje wirowe pole elektryczne [4,2,3].

Przemiany pola elektrycznego w magnetyczne i na odwrót oraz szybkość tych jest określana mianem częstotliwości a pulsacyjność nadaje charakter falowy [3,4]. W otwartej przestrzeni fala EM rozchodzi się niosąc ze sobą energię. Wówczas jej prędkość rozchodzenia się jest równa prędkości światła, czyli 300 000 km/s. Jednak, gdy fala napotka na swojej drodze obiekt może zmieniać kierunek. Jeśli zostanie odbita i nałoży się na falę padającą, powstaje tzw. fala stojąca, która może powodować miejscowe wzmocnienie lub osłabienie natężenia pola elektromagnetycznego. Jeżeli natrafi na obiekt mniejszy niż sama długość fali, może się odbić od niego i poruszać tym samym torem lub w zmienionym kierunku. Niektóre obiekty, jak na przykład organizmy żywe, są zdolne do pochłaniania części energii. Fala wnikać do wnętrza obiektu ulega w nim tłumieniu [3,5].

W zależności od zakresu częstotliwości fale EM różnią się od siebie właściwościami, zastosowaniem oraz wpływem, jaki wywierają na środowisko i ludzi. Na tej podstawie można podzielić widmo promieniowania EM na pasma. Częstotliwość 50Hz jest głównie wykorzystywana w urządzeniach zasilanych elektrycznie lub w liniach przesyłowych doprowadzających prąd do każdego domu. Zakres 100kHz-300MHz to zakres fal radiowych. Fale mikrofalowe w zakresie 300MHz-300GHz to fale, które mają ogromny wpływ na organizmy żywe [4,5].

Promieniowanie z zakresu 0-300MHz jest tzw. promieniowaniem niejonizującym, czyli cząsteczki, które pochłaniają taką energię nie rozpadają się na jony [4]. Natomiast wpływ, jaki wywiera na organizmy żywe zanika zaraz po skończeniu ekspozycji. Następstwa wpływu tego pola są zależne w dużej mierze od częstotliwości i przy dużych wartościach mogą prowadzić do efektu termicznego. Ciepło, jakie powstaje w tkankach wytwarzane jest poprzez ruch jonów, rotację dipolową lub ruch elektronów. Molekuły w obrębie pola elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości zwiększają swoją ruchliwość, co prowadzi do wzrostu temperatury. Drugi rodzaj zakresu PEM tzw. promieniowanie jonizujące, należące do wysokich częstotliwości jak nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie czy gamma [4]. Do tego, aby zaszło zjawisko jonizacji wymagana jest wysoka częstotliwość oraz

energia. Efekt jonizacji w organizmie powoduje powstanie zmian kumulujących się, co oznacza, że każda kolejna ekspozycja zwiększa efekt poprzedniej.

W organizmie człowieka brak jest receptorów, które odbierałyby obecność energii elektromagnetycznej w otoczeniu, zwłaszcza pól o niskiej częstotliwości. Dlatego bardzo często jesteśmy narażeni na ekspozycję i działanie sił PEM nie będąc tego świadomi. O tym, że PEM jest w naszym otoczeniu możemy się przekonać choćby za pomocą radia tranzystorowego. W miejscu gdzie występuje pole EM usłyszymy szumy i trzaski, czyli tzw. odgłosy PEM [3]. Dopiero, gdy znajdziemy się w zasięgu pól wysokich częstotliwości, możemy odczuwać bezpośrednie skutki takiej ekspozycji, wynikające z przemiany zaabsorbowanej energii EM na ciepło.

Wzrost temperatury w tkankach jest uzależniony zarówno od dawki energii pochłoniętej jak i przewodnictwa tkanek. Jak pokazują dane przewodnictwo tkanek zmienia się wraz z częstotliwością rosnąco. Ilość energii pochłoniętej przez organizm po ekspozycji na PEM określa wielkość SAR (specyficzny absorpcyjny współczynnik pochłaniania właściwego, który jednocześnie decyduje o głębokości wnikania, która jest określana jako głębokość, na której energia PEM zmniejsza się o 37% [2,5]). Podobnie jak przewodnictwo głębokość wnikania fali EM jest różna i zależna od częstotliwości.

Jak wynika z danych doświadczalnych najłatwiej wnikać do organizmu fale z zakresu 30-2000MHz i one stanowią największe zagrożenie dla człowieka. Poniżej 30MHz absorpcja jest głównie powierzchniowa i nie wnika w głąb ciała, przez co pozornie jest mniej groźne. Największe pochłanianie dotyczy zakresu fal 30-400MHz, powyżej tych wartości energia powoduje wzrost temperatury tkanek prowadząc do hipertermii [3,6]. Pola sieciowe niskiej częstotliwości oddziałują na organizm zupełnie inaczej. Powodują powstanie prądów indukowanych na powierzchni i wewnątrz ciała osoby, która poddana została ekspozycji na PEM 50Hz. Prądy te krążąc po powierzchni mogą prowadzić do zaburzeń czynnościowych organizmu, takich jak przekazywanie bodźców nerwowych czy praca serca [1,3]. Ponadto istnieją doniesienia o zwiększonym zachorowaniu na niektóre nowotwory związanym z długotrwałą ekspozycją na pola sieciowe. Jednak badania te nie są jednoznaczne i wymagają dalszej analizy. Więcej na temat wpływu, jaki wywiera pole elektromagnetyczne na organizm człowiek przedstawiono w dalszej części opracowania.

ŹRÓDŁA WYSTĘPOWANIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Pola elektromagnetyczne wytwarzane są w sposób naturalny, ale także w wyniku działalności człowieka. Od kilkunastu lat jesteśmy coraz bardziej otaczani polem EM, między innymi w skutek używania wielu urządzeń elektrycznych, a ciągły rozwój techniki dostarcza, co roku ok. 6% nowych źródeł promieniowania elektromagnetycznego. To, że PEM wpływa na środowisko i ludzi jest faktem niezaprzeczalnym, jednak obecny stan wiedzy nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie jak bardzo niebezpieczny i szkodliwy jest ten wpływ. W tej dziedzinie wciąż są prowadzone liczne badania. Dlatego też należy korzystać z wszelkich urządzeń emitujących PEM w taki sposób, aby nie narażać się na nad-

mierne zagrożenie [1,7]. Dla źródeł PEM, które mogą być szczególnie niebezpieczne dla zdrowia, zwłaszcza dla osób narażonych zawodowo, określone zostały strefy ochronne. Za strefę bezpieczną uważa się obszar wokół źródła gdzie przebywanie ludzi nie musi być limitowane czasowo. Natomiast spośród stref ochronnych, w których przebywanie wiąże się z większym niebezpieczeństwem wyróżniono:

- strefę niebezpieczną, czyli obszar wokół źródła, w którym przebywanie ludzi jest zabronione, gdyż jest to niebezpieczne dla życia i zdrowia,
- strefę zagrożenia, czyli obszar, w którym przebywanie ludzi jest dozwolone przez pewien okres czasu, krótszy niż jedna zmiana robocza,
- strefę pośrednią, stosowaną tylko w przypadku występowania pól powyżej 100kHz. Jest to obszar, w którym można przebywać przez okres zmiany roboczej.

Najbardziej rozpowszechnionym źródłem PEM w środowisku jest pole niskiej częstotliwości generowane przez linie przemysłowe. Energia elektryczna jest transportowana z elektrowni do każdego domu za pośrednictwem linii wysokiego, średniego i niskiego napięcia. Te wszystkie elementy jak również transformatory obniżające wartość napięcia, są źródłem PEM o częstotliwości 50/60 Hz. W przypadku transformatorów i linii wysokiego napięcia wartości pól EM mogą być znaczne. Bliskie sąsiedztwo z takimi liniami może powodować, między innymi zakłócenia odbioru radia czy telewizji, a także skutkować dużym oddziaływaniem na środowisko jak i organizm człowieka. Dlatego też linie wysokiego napięcia i transformatory są lokalizowane z dala od terenów zamieszkałych, a wokół nich są oznaczone strefy niebezpieczne bądź zagrożenia [3,5,7]. Ponadto na ekspozycję pól wartości 50 Hz jesteśmy narażani w otoczeniu naszych domów. Każdy sprzęt zasilany prądem elektrycznym jak: suszarka do włosów, maszynka do golenia, toster, mikser, lodówka, lampka nocna i inne, są źródłem PEM. Takie pola emitowane przez wiele urządzeń domowych mogą się odbijać od ścian, kumulować w niektórych miejscach a w niektórych wygasać. Istnieją doniesienia o zwiększonym ryzyku zachorowania na niektóre nowotwory, głównie białaczki i guzy mózgu wynikające z ciągłej ekspozycji na pola 50 Hz. Dlatego też należy mieć na uwadze obecność pola elektromagnetycznego planując rozmieszczenie urządzeń domowych [3,8,9].

Źródłem pól o wyższych częstotliwościach, z zakresu kilkunastu czy kilkuset kHz są między innymi monitory komputerowe i telewizory starszego typu. W odległości ok. 1 m od tych urządzeń występowały nadmierne pola elektromagnetyczne, i dlatego zalecano stosowanie filtrów. Obecne rozwiązania techniczne powodują to, iż ekrany komputerów i telewizorów są uznawane za całkowicie bezpieczne. Oprócz ekranów źródłem promieniowania EM z zakresu kHz są stacje nadawcze długo-, średnio- i krótkofalowe. Są to źródła pól wysokich częstotliwości, wokół których są wyznaczane strefy ochronne, gdyż przebywanie w ich zasięgu może powodować skutki zdrowotne, głównie zwiększać ryzyko zachowań na nowotwory. Takie niebezpieczeństwo maleje wraz z odległością od źródła. Innym źródłem pola z tego samego zakresu są piece indukcyjne o termicznej obróbki elementów stalowych. Tu także są wyznaczane strefy zagrożenia [3,5,9].

Na terenach zamieszkałych dość często są ustawiane maszty radiowe i telewizyjne oraz anteny nadawcze w pa-

śmie UKF/VHF. Takie nadajniki emitują dość niskie moce, a zasięg nie przekracza 80km. Anteny te pracują w zakresie częstotliwości od 50 do ponad 800MHz. Nieco niższą częstotliwość wykorzystuje się w radiotelefonach, tzw. CB radia, pracują w paśmie 27MHz. Przenośne urządzenia emitują dość niską moc, więc nie stanowią większego zagrożenia dla nikogo poza rozmówcą. Jednak w przypadku większych radiotelefonów montowanych np. na dachach budynków emitowane promieniowanie EM jest wykrywane do 10 m od anteny [3].

Bardzo powszechnym źródłem promieniowania elektromagnetycznego są popularne obecnie telefony komórkowe. System telefonii komórkowej wykorzystuje pasma z zakresu mikrofal, a dokładnie 800/900-1800/1900 MHz. Takie aparaty emitują dość małą moc rzędu kilku W. Jednak z uwagi na to, iż są bardzo blisko głowy nie należy lekceważyć oddziaływania tego promieniowania. Obecna cyfrowa technologia pozwoliła na jeszcze większe zmniejszenie mocy i przez to telefony oddziałują na nas z mniejszą mocą. Do tej pory naukowcy nie wypowiedzieli się jednoznacznie, co do tego czy telefony komórkowe mają szkodliwe działanie na organizm człowieka. Wciąż trwają liczne badania w tym zakresie. Wiadomo jest na pewno, że podczas korzystania z telefonu występuje duże oddziaływanie na mózg, co może powodować bóle głowy, bezsenność, trudności w koncentracji czy nawet utratę pamięci. Niektórzy doszukują się przyczyn rozwoju nowotworów jako wynik korzystania z telefonów komórkowych [3,7,9].

Oprócz samych telefonów komórkowych źródłem promieniowania elektromagnetycznego z zakresu MHz są stacje bazowe, które są pośrednikiem pomiędzy rozmówcą a siecią. Takich stacji jest obecnie kilkadziesiąt w Polsce a ich liczba wciąż rośnie, co jest związane ze wzrastającą liczbą użytkowników telefonów komórkowych. Stacje bazowe emitują moc rzędu kilku do kilkunastu watów, jednak wytwarzają wokół siebie dość silne pole EM. Z uwagi na brak wolnego miejsca, zwłaszcza w miastach, anteny telefonii komórkowej umieszczane są często na wysokich kominach czy dachach budynków. Oprócz oddziaływania na ludzi sygnał ze stacji bazowej zakłóca także odbiór radia czy telewizji, co stwarza dodatkowe niedogodności [3,6,7].

Wyższe częstotliwości zakresu mikrofalowego są stosowane w kuchenkach mikrofalowych. Urządzenia te wykorzystują głównie pasmo 2450MHz. Emisja fal elektromagnetycznych występuje wyłącznie wewnątrz kuchni, a dzięki dobrej jakości obudowy, odpowiedniemu uszczelnieniu nie wydostają się one poza nią. Jednak pomimo takich zabezpieczeń wokół drzwi kuchni występuje pole EM. Za bezpieczną odległość można przyjąć 1m. Ponadto w starych i zużytych kuchenkach mikrofalowych otłuszczone uszczelki nie spełniają już całkiem funkcji ochronnej i więcej fal EM może wydostawać się na zewnątrz, stanowiąc większe zagrożenie dla ludzi [3,7].

Fale elektromagnetyczne są także powszechnie wykorzystywane w medycynie. Jak wiadomo PEM z zakresu mikrofal może wnikać głęboko do wnętrza tkanek, a energia, jaką niesie ze sobą zamieniana jest na ciepło, co powoduje wzrost temperatury tkanek czy całych narządów. Lecznicze zastosowanie znajdują głównie fale o częstotliwości 27MHz noszą one nazwę diatermii krótkofalowej oraz o częstotliwości 2450MHz określane jako diatermia mikrofalowa. Są stosowane powszechnie w leczeniu wielu schorzeń orto-

pedycznych, reumatycznych i w przypadkach dolegliwości bólowych mięśni i stawów. Fale o częstotliwości 300-500 kHz nazywane prądami d'Arsonvala są obecnie stosowane głównie w kosmetyce [3,5,6].

Szerokie rozpowszechnienie źródeł PEM i urządzeń emitujących promieniowanie elektromagnetyczne sprawia, iż nie jest możliwe uniknięcie narażenia na PEM. Nowe rozwiązania techniczne pozwalają na maksymalne zmniejszenie oddziaływania promieniowania na organizm człowieka.

DZIAŁANIE BIOLOGICZNE PEM NA ORGANIZM

Ocena zagrożenia zdrowia w wyniku oddziaływania pola elektromagnetycznego jest bardzo trudna i na przestrzeni lat była obiektem zainteresowań wielu naukowców. Wyniki licznych badań są jednak rozbieżne i bardzo trudne do zweryfikowania [10], tak, więc w dalszym ciągu stan wiedzy nie pozwala na jednoznaczne i konkretne wskazanie efektów oddziaływania PEM na organizm [9]. Trudno jest także ustalić mechanizmy potencjalnego wpływu pola elektromagnetycznego. Wynika to z faktu, iż organizmy żywe są wysoce zorganizowane i złożone, a narządy i funkcje, jakie pełnią są wzajemnie powiązane i zależne. Ponadto organizm człowieka posiada dużą zdolność do adaptacji do warunków środowiska oraz do kompensacji i regeneracji [5]. Do badania wpływu interakcji PEM z biomateriałami używa się izolowanych błon komórkowych, frakcji subkomórkowych i pojedynczych komórek izolowanych *In vitro*. Atutem ich jest zachowany metabolizm, zdolność wzrostu, proliferacji oraz dojrzewania, a także reakcje na bodźce. Jednak wyizolowane ze skomplikowanego systemu, jakim jest organizm ludzki, pozbawione są jakiegokolwiek regulacji i kontroli oraz zdolności adaptacyjnych [6]. Podobnie jest w przypadku całych układów komórkowych, gdzie można dokładnie kontrolować warunki ekspozycji, a także obserwować mechanizmy i następstwa wpływu PEM. Na tym poziomie organizacji nie można jednak uzyskanych wyników odnosić bezpośrednio do całego organizmu ludzkiego [11].

Na podstawie dotychczasowych badań, można stwierdzić, że pierwszym miejscem działania pól elektromagnetycznych jest błona komórkowa. W konsekwencji dochodzi do zaburzeń transportu jonów i innych substancji z i do komórki, co ma wpływ na jej metabolizm i funkcjonowanie. Bezpośredni efekt działania PEM jest wyrażony poprzez reakcje termiczne, jakie powstają w organizmie oraz biologiczne zmiany, czyli wszystkie nietermiczne procesy rejestrowane podczas ekspozycji na PEM. Te wszystkie reakcje są rozpatrywane na poziomie komórek jak i całych organizmów.

Podczas wielu badań często obserwowanym efektem ekspozycji pól elektromagnetycznych na organizmy jest zmiana stosunku wolnych i związanych fosfolipidów błon komórkowych, co świadczy o tym, iż są one pierwotnym miejscem działania PEM. To między innymi zaburza działanie pompy sodowo-potasowej i transportu jonowego [1,6]. Aby utrzymać komórkę w stanie pobudliwości, czyli zdolności do odbierania i reagowania na bodźce, potrzebne jest utrzymywanie odpowiednio wysokiego stężenia jonów potasu i niskiego jonów sodu w jej wnętrzu. Taką rolę pełni między innymi pompa sodowo-potasowa. W przypadku, gdy praca pompy Na^+/K^+ jest zaburzona dochodzi do zaniku pobudliwości komórki i w konsekwencji zmian metabolicznych oraz funkcji enzymów w jej wnętrzu [1,12].

Jak wynika z wielu badań pola elektromagnetyczne hamują czynność pompy Na^+/K^+ , co powoduje zaburzenia transportu błonowego jonów, czemu towarzyszą zmiany aktywności niektórych enzymów komórkowych. Ponadto zmiany przepuszczalności błon komórkowych pod wpływem działania PEM powodują także zwiększony wypływ jonów wapnia z komórek. Jest to istotne gdyż prowadzić może między innymi do zmian przewodnictwa nerwowego. Rola jonów Ca^{2+} w organizmie jest bardzo istotna. Wpływają one między innymi na krzepliwość krwi, łagodzą reakcje alergiczne oraz regulują kurczliwość mięśni i pracę serca. Ponadto korzystnie wpływają na układ nerwowy i przekazywanie impulsów nerwowych, płodność i donoszenie ciąży oraz są składnikami kości, zębów i paznokci. Dodatkowo jony wapnia tworzą nierozpuszczalne kompleksy, które są cząsteczkami sygnałowymi w wielu szlakach przekazywania sygnałów oraz odgrywają znaczącą rolę w procesach komórkowych. Dlatego też stężenie jonów Ca^{2+} musi być utrzymywane na stałym poziomie. Zmiany poziomu wapnia w komórce spowodowane długotrwałą ekspozycją na promieniowanie EM prowadzą w głównej mierze do zaburzeń przewodnictwa komórkowego i przekazywania sygnałów. Niedobór wapnia łączy się także ze skurczami i zaburzeniem pracy mięśni, w tym także mięśnia sercowego. Zbyt mały poziom Ca^{2+} powoduje bezsenność, osłabienie pamięci, zawroty głowy oraz szybkie męczenie [1,6,13].

Zmiany przepuszczalności błon dla jonów sodu, potasu oraz wapnia, które są wywołane przez ekspozycję komórek na pola elektromagnetyczne, wpływają na metabolizm komórki. Następują wówczas zmiany aktywności wielu enzymów, głównie syntezy kwasów nukleinowych i białek, pobudzona zostaje proliferacja komórek, a także wzrasta zawartość kwasów nukleinowych w komórkach [14]. Badania wykonywane na komórkach poddawanych ekspozycji PEM wykazały także pośredni wpływ na DNA komórkowe, między innymi poprzez wzrost liczby wolnych rodników. Reaktywne formy tlenu powodują wiele zmian w makrocząsteczkach, atakując przeważnie białka czy DNA, co powoduje rozwój wielu schorzeń, jak choroby zwyrodnieniowe czy procesy starzenia. Spośród wszystkich wolnych rodników najbardziej toksyczny jest rodnik hydroksylowy $\text{OH}^\cdot$, który oddziałuje głównie na DNA zmieniając strukturę kodu genetycznego prowadząc do mutacji nowotworowych lub śmierci komórki [13,15]. Jak wynika z badań, działanie PEM powoduje wzrost wolnych rodników, co skutkuje zrywaniem nici DNA, wzrostem liczby mikrojader oraz aberracjami chromosomowymi. Mimo że późniejsze doświadczenia nie potwierdziły tego, nie należy lekceważyć działania genotoksycznego PEM na komórki i kontynuować badania w tym zakresie [15].

Kolejnym zjawiskiem obserwowanym przez autorów badań nad wpływem PEM na komórki jest indukowanie apoptozy, czyli programowanej śmierci komórki [15]. Apoptoza jest naturalnym regulatorem procesów dojrzewania komórek w organizmie. Ponadto uważana jest za jeden z ważniejszych mechanizmów obrony przed nowotworami [13,15]. Bardzo często zainfekowane wirusem komórki, na skutek zmian, jakie dokonały się w ich genomie, wchodzi na drogę programowanej śmierci przez apoptozę. Zaburzenia regulacji apoptozy mogą prowadzić do rozwoju chorób przebiegających z degeneracją tkanek, rozwoju chorób nowotworowych lub do śmierci organizmu [16]. Wśród czyn-

ników inicjujących apoptozę są: bodźce fizjologiczne jak np. hormony, zmiany stężenia jonów Ca^{2+} ; obecność cytokin czy limfocytów cytotoksycznych, np. podczas odrzucenia przeszczepu; czynniki fizyczne jak promieniowanie jonizujące; wirusy; obecność wolnych rodników. Na podstawie wyników badań można wnioskować, iż ekspozycja na PEM indukuje apoptozę w komórkach bezpośrednio, lub może wpływać na nią pośrednio poprzez zwiększoną ilość wolnych rodników czy zmiany stężenia jonów wapnia [17,18,19].

Kolejnym czynnikiem świadczącym o niekorzystnym działaniu PEM na organizmy żywe jest obserwowana w niektórych doświadczeniach zwiększona synteza białek szoku cieplnego (Hsp) w komórkach [1]. Białka szoku cieplnego działają jako białka opiekuńcze, odpowiedzialne za prawidłowe funkcjonowanie innych białek, renaturację i degradację zniszczonych lub uszkodzonych cząsteczek oraz ochronę białek przed zmianą ich struktur [13]. Dlatego też Hsp ulegają zwiększonej ekspresji pod wpływem czynników takich jak: podwyższona temperatura, miejscowe niedotlenienie tkanek, wzrost stężenia wolnych rodników, infekcje bakteryjne, czynniki stresowe czy promieniowanie jonizujące [20]. Prawidłowe funkcjonowanie oraz homeostaza komórki jest uzależniona od obecności Hsp, ponieważ część z nich, jak na przykład Hsp90, Hsp75, Hsp70 i inne, biorą udział w ich różnicowaniu i podziale komórkowym, a także w inicjacji apoptozy [15]. Z tych powodów badanie poziomu białek szoku cieplnego, zwłaszcza po ekspozycji na PEM, stało się istotne na przestrzeni ostatnich lat. Aczkolwiek i w tym przypadku wyniki takich analiz są bardzo rozbieżne. Niektórzy autorzy stwierdzili wzrost ekspresji białek Hsp pod wpływem działania pola elektromagnetycznego [21,22], niektórzy wskazują na zależność wzrostu ilości białek szoku cieplnego od czasu i intensywności napromieniowania [23], czy wręcz brak oznak większej ekspresji tych białek pod wpływem PEM [24].

Pośród innych prawdopodobnych efektów ekspozycji komórek na działanie pól elektromagnetycznych obserwowanych podczas badań doświadczalnych są zmiany aktywności komórek immunokompetentnych, zmiany przewodnictwa nerwowego oraz kancerogenność, zwłaszcza w obszarach wrażliwych na działanie PEM, jak gałka oczna, czy struktury mózgowe [5,6,14,25].

Zmiany jakie są wywołane na skutek ekspozycji na pola elektromagnetyczne przekładają się także na funkcjonowanie całego organizmu. Jednakże, z uwagi na to, iż nie prowadzi się badań doświadczalnych na organizmach żywych, trudno jest ustalić dokładne efekty narażenia na PEM oraz zrozumieć ich mechanizm działania. Dane, jakie są dostępne w literaturze dotyczą głównie ocen stanu zdrowia pracowników narażonych zawodowo na działanie PEM oraz osób przebywających lub mieszkających w zasięgu oddziaływania PEM. Najczęstszą reakcją na działanie pola elektromagnetycznego jest rozwinięcie się nieswoistej reakcji stresowej i zespołu adaptacyjnego [1,6,25]. Następują wówczas zmiany hormonalne, głównie wzrost poziomu kortykosterydów i spadek stężenia tyroksyny. Objawy długotrwałego stresu prowadzą do zaburzeń czynnościowych układu krążenia, jak zaburzenia rytmu serca czy wzrost ciśnienia krwi [10]. Stresogenny wpływ promieniowania elektromagnetycznego na organizm potwierdza występowanie tzw. efektu Frey'a, czyli zjawisko percepcji słuchowej. Osoby przebywające w zasięgu pól modulowanych impulsowo słyszą trzaski, gwizdy,

świsły czy kłaśnięcia. U podstawy tego działania może leżeć zjawisko termoelastyczności struktur ucha wewnętrznego, głównie labiryntu, który rozpręża się pod wpływem wahań temperatury związanych z absorpcją energii [5,6]. Ponadto, długotrwałe narażenie na sytuacje stresowe powoduje wykształcenie się objawów jak: różnego rodzaju nerwice wegetatywne, zmniejszenie płodności, utratę wczesnej ciąży, obniżenie masy urodzeniowej potomstwa, oraz osłabienie odporności przeciwbakteryjnej, przeciwwirusowej i przeciwnowotworowej organizmu [1,6,14]. Istnieją dane wskazujące, iż osoby narażone na kontakt z promieniowaniem elektromagnetycznym są bardziej podatne na rozwój chorób nowotworowych niż osoby nienarażone. Komórki zmienione nowotworowo charakteryzują się różnym od innych komórek stopniem różnicowania oraz wyłączeniem spod mechanizmów kontrolnych, a na rozwój choroby nowotworowej wpływa wiele czynników, jak czynniki środowiska życia i pracy, tryb życia, sposób odżywiania czy narażenie na substancje rakotwórcze. Przez wiele lat uważano, iż pola elektromagnetyczne nie wpływają na transformację nowotworową komórek. Doniesienia o większej liczbie zachorowań po ekspozycji na PEM tłumaczono głównie wpływem na układ immunologiczny organizmu. Dopiero, kiedy w latach 90-tych rozpoczęto intensywne badania nad wpływem PEM na rozwój chorób nowotworowych, Agencja Ochrony Środowiska USA (EPA) uznała pola EM za prawdopodobny czynnik rakotwórczy (klasa Ba) [9,26]. Na podstawie obserwacji stwierdzono, że PEM nie powoduje bezpośrednio transformacji nowotworowej, lecz działając jako promotor lub ko-karcinogen pomaga w dalszym rozwoju rozpoczętej karcinogenezy. Wykazano, bowiem, iż pola mikrofalowe modulowane wpływają na aktywność pewnych enzymów kluczowych w prawidłowym rozwoju komórki. Zaobserwowano zmiany w działaniu między innymi kinazy proteinowej C, odpowiedzialnej za reakcje limfocytów z miogenami czy dekarboksylazy ornitynowej istotnej w syntezie poliamid podczas syntezy DNA czy proliferacji komórek [26]. Ponadto pola elektromagnetyczne zaburzają mechanizmy komunikacji międzykomórkowej, co stwarza idealne warunki do wzrostu i rozwoju nowotworu. Jak wynika z przedstawionych obserwacji, PEM nie jest bezpośrednim czynnikiem powodującym transformację nowotworową, lecz wpływając na układ odpornościowy, proliferację komórek czy funkcjonowanie enzymów, może wspomagać rozwój nowotworu [9,26]. Ukazały się publikacje wskazujące na fakt, iż PEM niskiej częstotliwości wpływa na wzrost ryzyka zachorowania na chorobę Alzheimera, występowania demencji czy stwardnienia rozsianego [10,27,28]. Osoby narażone na długotrwały kontakt z PEM zgłaszały pewne zaburzenia i zmiany czynnościowe układu krążenia czy nerwowego, a także objawy pogorszenia samopoczucia, głównie bóle głowy, zmęczenie, bezsenność, zaburzenia koncentracji, „mrocзки” przed oczami, czy swędzenie i zaczerwienienie skóry. Objawy te mogą być skutkiem bezpośredniego wpływu, jaki mają pola EM na organizm, lub mogą być powodowane poprzez zmiany, jakie zachodzą w komórkach, między innymi zmianami stężenia jonów Ca^{2+} [6,10,13]. W dostępnej literaturze są także dane na temat zjawiska „nadwrażliwości na pola elektromagnetyczne”, objawiające się ogólnym poczuciem dyskomfortu psychicznego, zawrotami głowy, zaburzeniami koncentracji oraz stanami nerwicowymi [14].

Najbardziej mierzalnym efektem działania PEM jest zjawisko hipertermii, czyli podniesienia temperatury tkanek jak i całego organizmu. Przebywanie w polu o częstotliwości przekraczającej częstotliwość rezonansową (powyżej 400MHz) prowadzi do znacznego pochłaniania energii, która jest w organizmie zamieniana na ciepło. Jony, cząsteczki dipolowe i większe molekuly, pod wpływem zaabsorbowanej energii zwiększają swój ruch, a w wyniku zderzeń z innymi cząstkami zwiększają energię wewnętrzną, co powoduje wzrost temperatury. W normalnych warunkach dodatkowa porcja energii jest kompensowana przez reakcje obronne organizmu, w tym przez mechanizmy termoregulacji [5,6]. Podczas ich uruchomienia dochodzi do rozszerzenia naczyń krwionośnych skóry, przez co szybszej zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem, wytwarzana jest większa ilość potu oraz wzrasta wentylacja płuc. Gdy te mechanizmy staną się niewydolne, na skutek długotrwałej ekspozycji, bądź obecności pól o wysokiej częstotliwości, dochodzi do wzrostu temperatury tkanek [6]. Podniesienie temperatury może dotyczyć wybranego obszaru poddawanego ekspozycji, lub też całego organizmu. Przewlekły stan hipertermii może prowadzić do uszkodzenia struktur i funkcji tkanek między innymi przez nagrzewanie i wyparowanie wody w nich zawartej, co prowadzi do nieodwracalnych zmian [5,14]. Przyczyną śmierci termicznej jest uszkodzenie struktur centralnego układu nerwowego oraz niewydolność krążenia [6]. Szczególnie wrażliwe na każde zmiany temperatury otoczenia są organy słabo ukrwione, przez co pozbawione po części mechanizmów termoregulacji. Są to gałki oczne, głównie soczewki oraz jądra u mężczyzn [5]. W przypadku infekcji wirusowej czy innej choroby obserwowany jest nieznaczny wzrost temperatury ciała, co stymuluje układ odpornościowy do zwalczania przyczyny choroby. Podwyższona temperatura ciała podnosi naturalną odporność przeciwbakteryjną, przeciwwirusową oraz jest istotna w procesie leczenia nowotworowego. Zdrowe komórki reagują na wzrost temperatury w dwóch fazach. Początkowo, po nieznacznym wzroście temperatury do 37-40°C następuje pobudzenie procesów metabolicznych oraz wspomniana stymulacja układu immunologicznego organizmu. Dalszy wzrost temperatury do 41,5°C powoduje jednak zahamowanie metabolizmu, co w konsekwencji prowadzi do nieodwracalnych zmian i śmierci w temperaturze 45-46°C. Dochodzi wówczas do zahamowania proliferacji komórek, zwłaszcza tych, które są w fazie S cyklu komórkowego, czyli w czasie tworzenia kwasów nukleinowych. W zakresie temperatur 42-44°C zachodzi także uszkodzenie błon komórkowych i lizosomalnych oraz zahamowanie metabolizmu tlenowego. Jak się okazało komórki nowotworowe wykazują większą termowrażliwość niż zdrowe komórki. Dla nich zabójcza jest już temperatura 43-44°C. Stwarza to możliwości wykorzystywania sztucznej hipertermii do niszczenia komórek zmienionych nowotworowo, uwalniając ich tym samym na działanie promieniowania jonizującego czy cytostatyków [6]. Ponad to, jak wykazują badania, przekroczenie mechanizmów termoregulacyjnych w wyniku nadmiernej ekspozycji na pola elektromagnetyczne, głównie z zakresu radiofal i mikrofal, powoduje tymczasowy liniowy spadek podstawowej przemiany materii, proporcjonalny do ilości zaabsorbowanej energii. Po zakończeniu ekspozycji poziom podstawowej przemiany energii wraca do normy. Nieznaczna hipertermia i zahamowanie podstawowej przemiany materii powodują także zmiany behawioralne, jak upośledzenie wy-

konywania czynności wyuczonych czy obniżenie aktywności lokomotorycznych. Pochłonięcie większych ilości energii i w efekcie większy wzrost temperatury ciała, skutkuje wadami wrodzonymi oraz termicznym uszkodzeniem komórek soczewki oka, czyli zaćmą [6].

Gałka oczna jest bardzo słabo ukrwiona i z tego powodu możliwości termoregulacji są bardzo ograniczone. Dlatego jest ona bardzo wrażliwa i podatna na uszkodzenia termiczne. Osoby narażone na działanie silnych pól elektromagnetycznych obserwowały zmiany zachodzące w soczewce oka. Obecnie pomimo wielu badań, nadal nie do końca jest jasne, czy zaćma, która rozwija się jako następstwo ekspozycji na PEM jest wynikiem wyłącznie działania termicznego pól, czy także nietermicznych zmian, jakie zachodzą w komórkach soczewki oka. Wiadomo bowiem, iż w komórkach nabłonkowych siatkówki oka zachodzi szybka proliferacja oraz występuje wysoka aktywność Na⁺/K⁺ ATP-azy, które mogą być zmienione lub hamowane pod wpływem działania PEM [5,6].

Jak wynika z przedstawionych powyżej faktów, nie można jednoznacznie stwierdzić, że PEM jest szkodliwe dla zdrowia człowieka. Nadal trwają badania w celu dokładnego ustalenia mechanizmów działania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe.

PIŚMIENNICTWO:

1. Rochalska M. Wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy żywe: rośliny, ptaki i zwierzęta. *Med Pr*, 2007; 58(1): 37-48.
2. Szkolenie: "Nowoczesne tendencje w terapii fizykanej i ich rola we współczesnej medycynie". Przemysł „Gloria” 2009.
3. Szmigielski S. Pola elektromagnetyczne- niebezpieczny sprzymierzeniec. *Murator*, 1997; 1: 72-83.
4. Kubacki R. Własności fizyczne pól elektromagnetycznych 0-300GHz. Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18-22 października 1993; Zakopane. Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, Warszawa 1993, s.7-22.
5. Grabarczyk Z. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu 0-300GHz. W: Kędzia BB, Kowalewski S, Świder K, red. Zagrożenia elektromagnetyczne. Centralny Instytut Ochrony Pracy, 1997, s.9-57.
6. Sokolska G, Szmigielski S. Efekty biologiczne pól radio- i mikrofalowych w badaniach doświadczalnych Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18-22 października 1993; Zakopane. Warszawa: Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, 1993, s.101-121.
7. Moraszczyk M. Życie w elektrosmogu. *Zdrowie*, 2009; 11: 46-9.
8. Szuba M. Źródła pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz w środowisku człowieka Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18-22 października 1993; Zakopane. Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, Warszawa 1993, s.41-57.
9. Zmysłony M. Działanie biologiczne i skutki zdrowotne pól elektromagnetycznych w aspekcie wymagań raportów o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko. *Meda Pr*, 2007; 58(1): 27-36.
10. Sobiczewska E, Szmigielski S. Skutki zdrowotne ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne w świetle badań krajowych i zagranicznych. *Med Pr*, 2007; 58(1): 19-25.
11. Szmigielski S, Sokolska G, Sobczyński J. Efekty biologiczne i ryzyko zdrowotne pól elektromagnetycznych- metody badania, interpretacja wyników. Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18-22 października 1993; Warszawa: Zakopane. Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, 1993, s.75-90.
12. Solomon PE, Berg LR, Martin DW, Vilee C.A. *Biologia*. Warszawa: MULTICO Oficyna Wydawnicza; 2000.
13. Berg MJ, Tymoczko JL, Stryer L. *Biochemia*. Warszawa: PWN; 2007.
14. Sobiczewska E, Szmigielski S. Oddziaływanie biologiczne i ryzyko zdrowotne pól mikrofalowych o niskich natężeniach. <http://www.polaelektromagnetyczne.pl/publikacje-polskojezyczne.html>

15. Zmysłony M. Przegląd aktualnych wyników badań i ocen oddziaływania pól elektromagnetycznych na zdrowie ludności. Łódź, 2007. <http://www.polaelektromagnetyczne.pl/publikacje-polskojezyczne.html>
16. Kilarski W. Strukturalne podstawy biologii komórki. Warszawa: PWN; 2003.
17. Jian W, Wei Z, Zhigianq C, Zhenq F. X-ray-induced apoptosis of BEL-7402 cell line enhanced by extremely low frequency electromagnetic field in vitro. *Bioelectromagnetics*, 2009; 30(2): 163-5.
18. Okano H. Effects of static magnetic fields in biology: role of free radicals. *Front Biosci*, 2008; 13(1): 6106-25.
19. Yao C, Mi Y, Hu X, Li C, Sun C, Tang J, Wu X. Experiment and mechanism research of SKOV3 cancer cell apoptosis induced by nanosecond pulsed electric field. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2008; 2008:1044-7.
20. Gołąb J, Jakóbsiak M, Lasek W. *Immunologia*. Warszawa: PWN; 2006.
21. Li HW, Yao K, Jin HY, Sun LX, Lu DQ, Yu YB. Proteomic analysis of human lens epithelial cells exposed to microwaves. *Jpn J Ophthalmol*, 2007 Nov-Dec; 51(6): 412-6. Epub 2007 Dec 21.
22. Wang J, Koyama S, Komatsubara Y, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J. Effects of a 2450 MHz high-frequency electromagnetic field with a wide range of SARs on the induction of heat-shock proteins in A172 cells. *Bioelectromagnetics*, 2006 Sep; 27(6): 479-86.
23. Malagoli D, Lusvardi M, Gobba F, Ottaviani E. 50 Hz magnetic fields activate mussel immunocyte p38 MAP kinase and induce HSP70 and 90. *Comp. Biochem. Physiol C Toxicol Pharmacol*, 2004 Jan; 137(1): 75-9.
24. Bernardini C, Zannoni A, Turba ME, Bacci ML, Forni M, Meserica P, Remondini D, Castellani G, Bersani F. Effects of 50 Hz sinusoidal magnetic fields on Hsp27, Hsp70, Hsp90 expression in porcine aortic endothelial cells (PAEC). *Bioelectromagnetics*, 2007 Apr; 28(3): 231-7.
25. Dackiewicz A, Krawczyk A. Pola elektromagnetyczne a środowisko. <http://www.polaelektromagnetyczne.pl/publikacje-polskojezyczne.html>
26. Szmigielski S. Pola elektromagnetyczne (PEM) i nowotwory. Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18-22 października 1993; Zakopane. Warszawa: Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, 1993 s.137-163.
27. Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a metaanalysis. *Int J Epidemiol*, 2008 April; 37(2): 329-40.
28. Qiu C, Fratigilioni L, Karp A, Winblad B, Bellander T. Occupational exposure to electromagnetic fields and risk of Alzheimer's disease. *Epidemiology*, 2004; 15(6): 687-94.

Informacje o Autorach:

DOROTA STANIAK – Studenckie Koło Naukowe, mgr KRZYSZTOF SOKOŁOWSKI – instruktor, dr n. med. PIOTR MAJCHER – kierownik, Zakład Rehabilitacji i Fizjoterapii, Uniwersytet Medyczny w Lublinie

Adres do korespondencji:

Zakład Rehabilitacji i Fizjoterapii
Uniwersytet Medyczny w Lublinie
ul. Chodźki 6, 20-093 Lublin; tel. (81) 718 75 03