

Aspekty medyczne i biofizyczne promieniowania
elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej

Prof. dr hab. Eugeniusz Rokita

i

Dr hab. Grzegorz Tatoń

***Uniwersytet Jagielloński Collegium Medicum, Wydział Lekarski, Katedra
Fizjologii, Zakład Biofizyki***

1. Wprowadzenie

Promieniowanie elektromagnetyczne (EM) jest klasyfikowane według częstotliwości lub długości fali. Promieniowanie o częstotliwości radiowej jest określane arbitralnie jako promieniowanie EM w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 300 MHz, natomiast definicja promieniowania mikrofalowego obejmuje promieniowanie EM, którego częstotliwości obejmują zakres od 300 MHz do 300 GHz. Należy podkreślić, że nie istnieje jedna, powszechnie przyjęta definicja promieniowania EM o częstotliwości radiowej czy też promieniowania mikrofalowego. Zakresy częstotliwości są definiowane różnie, przez różnych autorów. Np. Cocurachi et al. [1] 10-3600 MHz; Gherardini et al. [2] 9-300000 MHz; Altunkayak et al. [3] 300-300000 MHz.

Wśród wszystkich częstotliwości w widmie promieniowania EM, częstotliwości radiowe i mikrofalowe są szeroko stosowane w większości nowoczesnych technologii telekomunikacyjnych i w związku z tym ich występowanie w środowisku gwałtownie wzrastało w ciągu ostatnich 25 lat. Różne obecnie stosowane technologie telekomunikacyjne wykorzystują różne zakresy promieniowania EM. Dodatkowo, w różnych krajach stosowane są różne technologie telekomunikacyjne i tym samym promieniowanie EM o określonych zakresach częstotliwości jest dominujące. Np. w Belgii system DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) występuje wewnątrz 75% badanych pomieszczeń. W Grecji dominujące zakresy częstotliwości pochodzą od GSM1800 (Global System for Mobile Communication) (25,6%) i WiFi 2G (Wireless Ethernet for Wireless Local Area) (30,1%), podczas gdy w Belgii od GSM900 (36,6%) i DECT (36,2%) [4]. Należy zwrócić uwagę, że narażenie na promieniowanie EM ze stacji bazowych telefonów komórkowych przyczynia się znacząco do całkowitej ekspozycji, ale nie jest dominujące, np. około 13% w Holandii [5].

W prezentowanym opracowaniu rozważania zostaną ograniczone do zakresu częstotliwości 500-5000 MHz, dla oznaczenia którego będzie używany skrót "RF EMF" (Radio Frequency Electromagnetic Field). Podany zakres częstotliwości odpowiada zakresowi długości fali (0.6-0.06) m. Promieniowanie o częstotliwości powyżej 5 GHz jest bardzo silnie pochłaniane przez skórę i tylko niewielka część energii promieniowania może oddziaływać na narządy wewnętrzne ludzkiego organizmu [2]. Obecnie badania oddziaływania promieniowania EM o częstotliwości powyżej 5 GHz na układy biologiczne nie są prowadzone. Sytuacja może ulec zmianie w najbliższych latach w związku z planami wprowadzenia nowej generacji technologii mobilnych (5G), wykorzystującej częstotliwości do 39 GHz. W przypadku niskich częstotliwości promieniowania (< 500 MHz) oddziaływania promieniowania EM jest stosunkowo słabe. Jedynie w przypadku bardzo szczególnych sytuacji, wykorzystywanych terapeutycznie, możliwe jest wywołanie przez promieniowanie o częstotliwości w tym zakresie znaczących skutków termicznych. Należy także podkreślić, że wybrany zakres jest obecnie bardzo intensywnie badany, co odzwierciedla literatura tematu.

W przeciwieństwie do promieniowania jonizującego, tj. promieniowania ultrafioletowego, promieniowania X i γ , promieniowanie RF EMF nie jest w stanie

spowodować bezpośredniego zniszczenie struktury molekuł w układzie biologicznym ze względu na zbyt niską energię kwantów [6]. Jedynym, jednoznacznie potwierdzonym efektem działania RF EMF na układ biologiczny jest podniesienie temperatury układu [1]. W wielu doniesieniach naukowych autorzy postulują występowanie innych niż termiczne, negatywnych efektów działania RF EMF na układy biologiczne. W wielu przypadkach obserwowane efekty nie znajdują interpretacji na gruncie mechanizmów biofizycznych. Postulowany jest także negatywny wpływ RF EMF dla gęstości mocy promieniowania znacznie niższych od poziomów odpowiedzialny za efekty cieplne. Należy także podkreślić, że dostępne wyniki badań eksperymentalnych i epidemiologicznych, przeprowadzanych zarówno w warunkach *in vitro* jak i *in vivo* są w wielu wypadkach sprzeczne [2]. Bazując na opublikowanych wynikach w czasopiśmie naukowych nie można jednoznacznie potwierdzić negatywnego wpływu ekspozycji RF EMF na człowieka [7]. Biorąc jednak pod uwagę potencjalne ryzyko negatywnych skutków zaleca się, podobnie jak dla promieniowania jonizującego, stosowanie reguły ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

Celem poniższego opracowania jest: (1) krótkie przedstawienie ilościowego opisu działania RF EMF na żywe organizmy w oparciu o mechanizmy biofizyczne, (2) omówienie najnowszych badań wpływu RF EMF na organizm człowieka wykonywanych w różnych ośrodkach krajowych i zagranicznych oraz (3) wypunktowanie najistotniejszych aspektów badań, których standaryzacja pozwoli wyeliminować istniejące niejednoznaczności i zapewni możliwość rzetelnego porównywania wyników w przyszłości.

2. Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego na układy biologiczne

Ilościowy opis oddziaływania EMF z układem biologicznym wymaga, na wstępie, przypomnienia podstawowych informacji o źródłach promieniowania elektromagnetycznego (antenach). Należy zwrócić uwagę, że promieniowanie EM jest generowane w sposób naturalny w wyniku procesów w atmosferze ziemskiej lub też może pochodzić ze źródeł galaktycznych. Naturalne promieniowanie EM charakteryzuje się znacznie niższą intensywnością, wiele rzędów wielkości, niż promieniowanie związane z działalnością człowieka. Przestrzeń wokół anteny można podzielić, w najprostszym opisie, na dwa obszary w zależności od odległości od anteny. Wyróżniamy tzw. pole bliskie i pole dalekie w otoczeniu anteny [8]. Granica obu obszarów występuje w odległości, która zależy od rozmiaru anteny i długości fali (λ) promieniowania EM (około $- 2D^2/\lambda$, gdzie D jest maksymalnym wymiarem anteny). Odległość $2D^2/\lambda$ wynosi około 3 cm dla anteny o maksymalnym wymiarze 5 cm i promieniowania o częstotliwości 2 GHz. Wynika stąd, że w przypadku opisu oddziaływania promieniowania generowanego przez telefon komórkowy na człowieka mamy do czynienia zarówno z polem bliskim jak i z polem dalekim. W przypadku promieniowania stacji bazowej telefonii komórkowej możemy ograniczyć rozważania tylko do pola dalekiego.

W polu bliskim, wektor elektryczny i wektor magnetyczny nie są do siebie prostopadłe, a ich orientacja zmienia się od punktu do punktu w przestrzeni. W związku z tym prosty związek gęstości mocy promieniowania i natężenia pola elektrycznego/magnetycznego nie

stosuje się w tym obszarze. Powszechną praktyką jest, niezależnie opisywanie interakcji układu biologicznego z polem elektrycznym i magnetycznym dla pola bliskiego. Powoduje to, że używanie określenia „pole elektromagnetyczne” (Electromagnetic Field - EMF) zamiast określenia „promieniowanie elektromagnetyczne” (Electromagnetic Radiation - EMR) jest w pełni uzasadnione w tym obszarze. W obszarze pola dalekiego pola elektryczne i magnetyczne są do siebie prostopadłe, dzięki czemu możliwe jest obliczenie/pomiar gęstości mocy promieniowania. W związku z tym, określenia "oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z układem biologicznym", czy też "promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej – RF EMR) są całkowicie poprawne w obszarze pola dalekiego. Problem konstrukcji anten oraz precyzyjnego opisu rozkładu przestrzennego promieniowania generowanego przez anteny nie wchodzi w zakres niniejszego opracowania i nie będą bardziej szczegółowo omawiane.

2.1. Podstawy biofizyczne

RF EMR rozchodząc się w dowolnym ośrodku, wytraca energię przekazując ją do ośrodka [9]. Spadek natężenia promieniowania elektromagnetycznego jest związany wykładniczo z głębokością wnikania do penetrowanego ośrodka:

$$P(z) = P(0)e^{-2\alpha z} \quad (1)$$

gdzie $P(0)$ i $P(z)$ to gęstość początkowa mocy i gęstość mocy na głębokości z , z równa się grubości absorbenta, natomiast α jest współczynnik absorpcji. Współczynnik absorpcji zależy od częstotliwości promieniowania ($\omega = 2\pi\nu$) oraz przewodności (σ), przenikalność elektrycznej ($\epsilon =$ względna stała dielektryczna razy ϵ_0) i przenikalności magnetycznej (μ – przenikalność magnetyczna powietrza i substancji biologicznych jest w przybliżeniu równa przenikalności magnetycznej próżni, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \left\{ \sqrt{\left| 1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 \right|} - 1 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

Niekiedy własności absorpcyjne ośrodka charakteryzujemy przez podanie tzw. głębokości penetracji δ . Absorbent o grubości $z = \delta$, redukuje gęstość mocy promieniowania EM do $e^{-2} = 0.135$ pierwotnej wartości, czyli 86.5% energii jest pochłaniane w warstwie o grubości równej δ . Na przykład, współczynnik pochłaniania tkanki mięśniowej dla promieniowania o częstotliwości 2.45 GHz ($\sigma = 2.21 (\Omega\text{m})^{-1}$, stała dielektryczna = 47) jest równy 0.6 cm^{-1} , a głębokość penetracji wynosi 1.67 cm. Należy zauważyć, że szybkość wytwarzania ciepła w tkance jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu głębokości penetracji. W związku z tym tkanka o małej głębokości penetracji, ze względu na dużą zawartość wody (np. tkanka mięśniowa, $\delta = 1.67 \text{ cm}$ dla częstotliwości 2.45 GHz), będzie się szybciej ogrzewać w wyniku ekspozycji na RF EMR niż tkanka, dla której głębokość penetracji jest duża ze względu na niską zawartość wody (np. tkanka tłuszczowa, $\delta = 8.1 \text{ cm}$ dla częstotliwości 2.45 GHz). W rezultacie

szybkość podgrzewania tkanki mięśniowej będzie około 25 razy większa niż dla tkanki tłuszczowej.

Każdy układ biologiczny zawiera wolne i/lub związane ładunki elektryczne. Przyłożeni zewnętrznego pola elektrycznego może spowodować zarówno ruch jak i zmianę konfiguracji ładunków, a tym samym indukować przepływ prądu elektrycznego i/lub polaryzację. Ilościowy opis działania zmiennych w czasie pól elektrycznych na układy biologiczne wymaga znajomości zależności parametrów charakteryzujących własności elektryczne układu (przewodność i przenikalność) od częstotliwości pola elektrycznego. Z reguły, rozważane są sinusoidalnie zmienne pola i liniowa odpowiedź układu, niesinusoidalne pola i efekty nieliniowe (np. efekt elektroporacji) są opisywane z zastosowaniem specjalnych modeli. Dla większości układów biologicznych przenikalność magnetyczna niewiele różni się od przenikalności magnetycznej próżni, co oznacza, że oddziaływania ze składową magnetyczną EMF jest bardzo słabe i dodatkowo nie zależy od częstotliwości zastosowanego pola zewnętrznego.

Zależność przewodności i przenikalności elektrycznej od częstotliwości są opisane, przy użyciu modelu Debey'a i jego modyfikacji. Bardzo często model Cole-Cole jest używany w analizie dielektrycznych właściwości substancji biologicznych [10]. Należy podkreślić, że układy biologiczne są układami niejednorodnymi zbudowanymi z materiałów zawierających wodę, cząsteczki organiczne, jony i substancje nierozpuszczalne. Obecność jonów odgrywa ważną rolę w oddziaływaniu z polem elektrycznym. Przepływy jonów tworzy prądy przewodzenia i może wytwarzać polaryzację układu, wskutek gromadzenia się ładunków na granicach struktur tkankowych. Zespolona przenikalność elektryczna tkanek jest z reguły opisywana ilościowo z wykorzystaniem czterech składowych modelu Cole-Cole i członu opisującego przewodność [11]. Podsumowując, dielektryczne właściwości substancji biologicznych i ich zależność od częstotliwości są dobrze opisane na podstawie modeli fizycznych. W literaturze tematu są dostępne dane podające wartości parametrów dielektrycznych w funkcji częstotliwości dla większości tkanek ciała ludzkiego [12]. W zakresie RF EMF, substancje biologiczne nie są ani bardzo dobrymi przewodnikami elektrycznymi ani bardzo dobrymi izolatorami, z wyjątkiem błon komórkowych, które można traktować, z bardzo dobrym przybliżeniem, jako dielektryki. Efekt ekspozycji organizmu człowieka na RF EMF można ilościowo opisać podając wartości pól elektrycznych i prądów indukowanych wewnątrz organizmu. Osobnym problemem jest opis efektów nieliniowych. W polach o dużych natężeniach przewiduje się teoretycznie występowanie zjawisk polaryzacji molekularnej i komórkowej. Próg intensywności RF EMF dla występowania efektów nieliniowych jest zależny od konkretnego układu i od częstotliwości promieniowania. Postuluje się także, że efekty nieliniowe w komórkach są możliwe dla stosunkowo słabych pól EM [13].

Jak wspomniano, antena emituje RF EMR do otaczającego ją ośrodka (powietrza). Następnie promieniowanie rozchodzi się w powietrzu i dociera do granicy między powietrzem i układem biologicznym. Na granicy dwóch ośrodków RF EMR będzie częściowo odbijane a częściowo penetruje granicę i rozchodzi się w drugim ośrodku ulegając refrakcji. W przypadku

ciała ludzkiego, w pierwszej kolejności powstaje problem ilościowego opisu zachowania się RF EMR na granicy powietrza/skóra. Podobny problem pojawia się na każdej granicy dwóch struktur tkankowych wewnątrz organizmu, czyli na granicy dwóch tkanek charakteryzujących się różnymi parametrami dielektrycznymi (przewodność, przenikalność elektryczna). Ilościowy opis pola EM penetrującego granicę dwóch ośrodków i oddziaływania z układem biologicznym jest zależny od tego, czy z efektami mamy do czynienia w polu bliskim czy w polu dalekim anteny. Odbicie lub przenikanie fali elektromagnetycznej do tkanki jest funkcją częstotliwości RF EMR (długości fali). Należy podkreślić, że do ilościowego opisu oddziaływania RF EMF z układem biologicznym, jest również niezbędne uwzględnienie relacji między długości fali promieniowania i wymiarami obiektu.

Rozkład pola elektrycznego wewnątrz układu biologicznego można określić korzystając w wielu metod obliczeniowych [14]. W istocie jest to problem rozwiązania równań Maxwella. Stosowane metody można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa metod opiera się na wykorzystaniu rozwiązań analitycznych do opisu rozkładu pola elektrycznego. Rozwiązania analityczne są możliwe jedynie w przypadku przyjęcia uproszczonej geometrii układu biologicznego (np. fala płaska pada na płaszczyznę pod zerowym kątem padania lub kąt padania może być dowolny). Druga grupa metod opiera się na wykorzystaniu metod numerycznych. Z stosowanych metod numerycznych trzy metody wydają się być najczęściej stosowane do przeprowadzenia obliczeń w realistycznej geometrii układu. Są to: (1) metoda momentów (MoM - Method of Moments) [15], metoda elementów skończonych (FEM - finite element method) [16] i metoda różnic skończonych w domenie czasu (FDTD - finite difference time domain) [17].

Dodatkowym problemem, skorelowanym z obliczeniami rozkładu pola i energii zasorbowanej w układzie, jest modelowanie geometrii obiektów biologicznych. Proste modele jak kule i sferoidy można wykorzystać do opisu geometrii w przypadku małych zwierząt laboratoryjnych lub niektórych części ciała. Z pewnością nie są to odpowiednie modele geometryczne dla opisu całego ciała człowieka w różnych warunkach ekspozycji. Realistyczne modele geometrii są obecnie tworzone w oparciu pomiary z wykorzystaniem różnych technik obrazowania medycznego i opisują geometrię ciała ludzkiego przy pomocy wielu milionów voxelów [18]. Zastosowanie opisanych modeli geometrycznych zapewnia precyzyjne obliczenie przestrzennej absorpcji energii w dowolnym układzie biologicznym poddanym naświetlaniu RF EMR o określonych parametrach.

Wyżej opisane techniki umożliwiają obliczenia rozkładu RF EMF wewnątrz układów biologicznych. Aby określić energię przekazywaną do układu w jednostce czasu (moc), z reguły, obliczamy parametr dozymetryczny, tzw. szybkość absorpcji właściwej (swoistej) (SAR – Specific Absorption Rate) wyrażany w układzie SI w W/kg. Znając, obliczony rozkład wartości pola elektrycznego E (V/m) SAR można obliczyć z wzoru:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad (3)$$

gdzie σ jest przewodnością elektryczną ($1/(\Omega m)$) a ρ jest gęstością (kg/m^3) tkanki. Powszechną praktyką eksperymentalną jest określanie SAR w oparciu o szybkość wzrostu temperatury, szczególnie dla krótkich ekspozycji. Pod pojęciem krótkiej ekspozycji należy rozumieć, że w czasie ekspozycji efekt transportu ciepła w tkance można zaniedbać. W tym przypadku szybkość wzrostu temperatury jest związana z SAR zależnością:

$$SAR = \frac{c}{\Delta t} \Delta T \quad (4)$$

gdzie ΔT oznacza wzrost temperatury (K), c jest pojemnością cieplną tkanki ($J/(kgK)$) a Δt oznacza czas trwania (s), w czasie którego wyznaczamy ΔT . Z równania 4 wynika jednoznacznie, że wzrost temperatury tkanki w czasie pochłaniania energii RF EMR, jest proporcjonalny do wartości SAR.

2.2. Efekty termiczne

Budowę każdego układu biologicznego można opisać stosując model strukturalnej matrycy która jest zanurzona w roztworze. Strukturalna matryca jest zbudowana z cząsteczek, często spolaryzowanych, podczas gdy roztwór zawierają wodę i wiele różnych jonów, zarówno atomowych jak i cząsteczkowych. Pod wpływem RF EMF, na polarne cząsteczki i jony działają siły elektryczne. Siły elektryczne są odpowiedzialne za dwa efekty. Po pierwsze, siły elektryczne będą wywoływać przepływy prądów rozpuszczonych jonów i zgodnie z powszechnie znanymi mechanizmami fizycznymi, doprowadzą do wzrostu temperatury tkanki (ogrzewanie Joule'a). Drugim możliwym efektem w przypadku, gdy jony (cząsteczki polarne) nie mogą się swobodnie przemieszczać, jest indukowanie oscylacji i/lub obrotów cząsteczek dla uzyskania właściwej orientacji w polu elektrycznym. Oscylacje/obroty napotykać na opór sił międzycząsteczkowych, a praca wykonywana przez pole elektryczne dla przezwyciężenia sił oporu jest finalnie zamieniana na ciepło (ogrzewanie dielektryczne). Zazwyczaj oba efekty zachodzą jednocześnie, chociaż w zależności od budowy układu i częstotliwości promieniowania w różnych proporcjach. Można stwierdzić, że układ biologiczny naświetlany RF EMR będzie absorbował energię promieniowania, która zostaje wykorzystana na zwiększenie temperatury układu. Skutki biologiczne ekspozycji związane, bezpośrednio lub pośrednio, ze wzrostem temperatury określamy mianem efektów termicznych. W sytuacji, gdy ewentualnych skutków biologicznych nie można skorelować z ogrzewaniem tkanki, mówimy o występowaniu efektów nietermicznych.

Rozważając ogrzewanie organizmu człowieka w wyniku działania RF EMR należy pamiętać o dwóch faktach fizjologicznych. Po pierwsze, wzrost temperatury ciała aktywuje mechanizmy strat ciepła przez organizm. Powszechnie wiadomo, że w spoczynku każdy organizm ludzki produkuje energię w ilości opisanej przez tzw. podstawową przemianę materii (BMR – Basal Metabolic Rate). Równanie Harris-Benedicta, powszechnie stosowane w fizjologii do oszacowania BMR pozwala określić, że w spoczynku organizm człowieka wytwarza w wyniku przemian metabolicznych energię z szybkością około 1700 kcal/d (80 W). Można oszacować, że bez strat ciepła przez organizm, temperatura ciała będzie rosła z szybkością

około 1.2 K/h. Dowodzi to jednoznacznie, że w organizmie człowieka działają bardzo efektywne mechanizmy utrzymujące stałą temperaturę ciała. Dodatkowe ogrzewanie organizmu powodowane przez RF EMF jest na pewno, przynajmniej w dużej części, kompensowane przez mechanizm strat ciepła [19]. Nasuwa się pytanie o efektywność mechanizmów utrzymywania stałej temperatury organizmu. Należy zauważyć, że dla ssaków temperatura wewnętrzna ciała jest utrzymywana na stałym poziomie a maksymalne wahania nie przekraczają +/- 0.5 K.

Osobny problem dotyczy czasu trwania ekspozycji RF EMF. Dla krótkich ekspozycji (< 30 s) transport ciepła wewnątrz tkanki ciała może być zaniedbany. W przypadku długich ekspozycji (~min) transport ciepła znacząco wpływa na rozkład temperatury. Należy zauważyć, że RF EMF wytwarza w tkance niejednorodny rozkład temperatury. Efekty absorpcyjne występują najintensywniej w warstwach powierzchniowych i dodatkowo są zależne od częstotliwości promieniowania (równania 1 i 2). Końcowa temperatura tkanki jest funkcją energii zdeponowanej przez RF EMF ($Q(r)$), szybkości przemian metabolicznych ($A(r,T)$), przewodnictwa cieplnego ($\nabla(K(r)\nabla T)$), strat ciepła wskutek oddychania $R(r,T)$ i perfuzji krwi ($B(r,t)(T-T_B(t))$). Wszystkie wymienione wyżej procesy uwzględnia równanie Pennesa [20]:

$$c(r)\rho(r)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K(r)\nabla T) + A(r,T) + Q(r) - R(r,T) - B(r,T)(T - T_B(t)) \quad (5)$$

gdzie c i ρ to pojemność cieplna i gęstość tkanki, K jest przewodnością cieplną tkanki, B jest iloczynem pojemności cieplnej krwi i szybkości perfuzji krwi, T i T_B to temperatura tkanki i krwi, a " r " i " t " oznaczają współrzędne przestrzenne i czas. Inne mechanizmy strat ciepła przez organizm są uwzględniane w warunkach brzegowych. Mimo że analityczne rozwiązanie równania Pennesa nie jest możliwe, metody numeryczne umożliwiają precyzyjne obliczenie rozkładu temperatury wewnątrz ludzkiego ciała. Oczywiście konkretne rozwiązanie jest zależne od przyjętych wartości parametrów. Uzyskane wyniki wielokrotnie korelowano z pomiarami uzyskując bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Można uznać, że równanie Pennesa pozwala bardzo precyzyjnie wyznaczyć rozkład temperatury wewnątrz ciała ludzkiego generowany naświetlaniem RF EMF. Ponieważ znana jest również zależność czasowa zmian temperatury, możliwe jest dalej wyznaczenie czasowo-przestrzennych zmian SAR. Należy wyraźnie podkreślić, że efekt hipertermii wywołany naświetlaniem organizmu RF EMF jest jedynym efektem, który możemy ilościowo opisać na gruncie rozważań fizycznych. Analizując budowę anatomiczną ciała człowieka i uwzględniając równanie 1, należy się w pierwszej kolejności spodziewać efektów biologicznych hipertermii dla oczu i jąder. Oba narządy są stosunkowo słabo ukrwione (równanie 5, regulacja temperatury w wyniku perfuzji krwi) i są zlokalizowane w warstwach powierzchniowych organizmu.

Pomijając analizę rozkładu temperatury i wartości SAR w organizmie, ponieważ są one zależne od konkretnego przypadku, poniżej przeprowadzono oszacowania wielkości hipertermii przy użyciu gęstość mocy RF EMR jako niezależnego parametru. Jeśli założymy, że naświetlana RF EMF powierzchnia ciała to 0.8 m² (wartość ta odpowiada powierzchni ciała

równiej $\sim 2 \text{ m}^2$), a gęstość mocy RF EMF wynosi 100 W/m^2 (10 mW/cm^2) to otrzymamy, że ilość dostarczanej do organizmu energii w jednostce czasu wynosi 80 W. Jest to wartość równa wartości BMR. Należy podkreślić, że poziomy bezpieczeństwa w odniesieniu do ekspozycji ludzi na RF EMF są różne w różnych krajach, ale nigdy nie przekraczają 10 W/m^2 [21].

Teoretycznie, podwyższenie temperatury może powodować wiele skutków pośrednich w organizmie człowieka. Efekty mogą być ograniczone do małych struktur biologicznych (pojedyncza komórka) lub mogą być związane z większą objętością (mm^3 lub większa). Na poziomie pojedynczej komórki najważniejszym efektem wydają się możliwość modyfikacji szybkości reakcji biochemicznych. Najprostszego opisu teoretycznego relacji szybkość reakcji – temperatura można dokonać w oparciu o równanie Arrheniusa [22]. Znamiennej cechą tego równania jest, że szybkość reakcji eksponencjalnie zmienia się z temperaturą. W związku z tym małe zmiany temperatury mogą prowadzić do znaczących zmian szybkości reakcji biochemicznej. Przybliżone oszacowanie, poprawne dla wielu reakcji, oparte na równaniu Arrheniusa pozwala stwierdzić, że szybkość reakcji podwaja się przy wzroście temperatury o 10 K.

Oprócz zmian szybkości reakcji chemicznych wzrost temperatury może powodować zmiany syntezy białek i wiązania białek do błony komórkowej. Jest dobrze udokumentowane, że każda komórka reaguje na podwyższoną temperaturę przez produkcję tak zwanych białek szoku cieplnego (HSP – Heat Shock Protein) [23]. Wiele białek szoku cieplnego wykazuje aktywność białek opiekuńczych (chaperone) zapobiegając agregacji lub zabezpieczając właściwą konformację białka natywnego. Syntezę HSPs należy traktować jako czynnik korzystny w utrzymaniu homeostazy komórki. Okazuje się jednak, że HSPs odgrywają również znaczącą rolę w procesach degradacji białek, w tym w szlaku degradacji związanym z siateczką śródplazmatyczną, układem ubikwityna-proteasom i w procesie autofagii. Tak więc białka szoku cieplnego wykazują zarówno korzystny jak szkodliwy wpływ na komórki organizmu człowieka [24]. Dokładny opis roli białek szoku cieplnego i tym samym jednoznaczne określenie ich roli w komórce wymaga jednak dalszych badań.

Podniesienie temperatury układu biologicznego powoduje również zmiany wartości wielu parametrów, istotnych z punktu widzenia homeostazy całego organizmu. Wiele parametrów stosowanych w opisie funkcjonowania ustroju, np. lepkość płynów ustrojowych, rozpuszczalność gazów w płynach ustrojowych, ciepło właściwe tkanek, współczynniki dyfuzji, przewodności elektryczne tkanek, itp. jest funkcją temperatury. Wzrost temperatury prowadzi również do rozszerzalności cieplnej układu a gwałtowny wzrost temperatury może wywołać powstawanie fal akustycznych. Oprócz wartości zmiany temperatury można wykazać teoretycznie, że tempo wzrostu temperatury jest bardzo ważne i może powodować dodatkowy przepływ jonów przez błonę komórkową. Wszystkie wyżej wymienionych efekty, powodowane wzrostem temperatury, opierają się głównie na teoretycznych rozważaniach lub są wynikiem eksperymentów laboratoryjnych. Na obecnym poziomie wiedzy jest niemożliwe jednoznaczne określenie, czy dana ekspozycja RF EMF będzie powodować znaczące skutki w

układzie biologicznym. Nie jest nawet możliwe, w wielu przypadkach, aby ustalić, czy mamy do czynienia z korzystnym czy też ze szkodliwym działaniem. Na przykład, wzrost temperatury jest skorelowane ze zmniejszeniem lepkości płynów ustrojowych, co z kolei ułatwia transport (konwekcja i dyfuzja) płynów ustrojowych. Można to powodować wzrost perfuzji krwi, co powoduje z kolei bardziej wydajne chłodzenie tkanki, czyli zmniejsza efekt termiczny związany z naświetlaniem RF EMF. Z drugiej strony, zwiększenie przepływu objętościowego w kapilarach wprowadza zakłócenia transportu gazów przez ściany naczyń włosowatych i może wywołać zmiany metabolizmu tkanek. W ostatnich kilku dziesięcioleciach przeprowadzono wiele różnych badań efektów termicznych RF EMF w układach biologicznych. Wyżej opisane efekty stanowią przegląd opublikowanych danych. Przy obecnym stanie wiedzy potrafimy precyzyjnie określić rozkład temperatury wewnątrz ciała człowieka. Niestety ilościowe powiązanie wzrostu temperatury ze skutkami biologicznymi pozostaje nieznane.

2.3. Efekty nietermiczne

Powyżej opisane efekty termiczne RF EMF mogą występować w naświetlanych układach jednak nie możemy zakładać *a priori*, że są to tylko jedyne efekty biologiczne wywołane przez RF EMF. Hipotetycznie, RF EMF może wywoływać cały szereg efektów nawet przy niewielkich wzrostach temperatury. Dla przeprowadzenia klasyfikacji efektów, jako termiczne i nietermiczne, konieczne jest ustalenie granicznej wartości wzrostu temperatury ΔT , poniżej którego efekt będzie klasyfikowany jako nietermiczny. Bazując na zebranych danych, z różnych metod wywoływania hipertermii, można przyjąć $\Delta T = 1$ K.

Rozważany w opracowaniu zakres częstotliwości promieniowania EM, upoważnia do zakwalifikowanie RF EMF do promieniowania niejonizującego. Oznacza to, że energia kwantów promieniowania jest zbyt niska dla wywołania jonizacji atomów lub cząsteczek. Wartości energii kwantów dla kilku rodzajów promieniowania jonizującego podano w tabeli 1. Ponieważ typowe energie jonizacji są rzędu 10 eV, tabela 1 jednoznacznie dowodzi, że rozważany zakres RF EMF charakteryzuje się energią kwantów znacznie poniżej energii jonizacji wszelkich znanych substancji.

W układach biologicznych występuje wiele różnych związków chemicznych i zachodzi wiele różnych reakcji biochemicznych. Naturalne jest pytanie czy omawiane RF EMF może modyfikować wiązania chemiczne w cząsteczkach. W tabeli 2 przedstawiono energie wiązania dla różnych typów wiązań chemicznych i dla porównania energię ruchów termicznych dla temperatury 310 K (temperatura ciała). Porównanie danych w tabelach 1 i 2 dowodzi, że RF EMF charakteryzują się niską energią kwantów, które jest o 3-4 rzędy wielkości poniżej typowej energii wiązania Van der Waalsa. Całkowicie uzasadniony wydaje się wniosek, że prawdopodobieństwo wywołania modyfikacji struktury cząsteczek przez RF EMF jest znikome. Nawet wzbudzenia biomolekuł przez RF EMF wydają się być mało prawdopodobne [25]. Aby wzbudzić rotację dwuatomowej cząsteczki zastosowanie promieniowania EM o częstotliwości wyższej niż ~ 30 GHz jest konieczne. Wywołanie wibracji dwuatomowych cząsteczek wymaga energii rzędu 0,04 eV (zakres IR). Typowe częstotliwości drgań w układzie z wiązaniami

wodorowymi są rzędu 300 GHz, czyli dwa rzędy wielkości większe niż rozważany zakres RF EMF. Podane liczby jednoznacznie dowodzą, że rozważane RF EMF, z powodu zbyt niskiej energii kwantów, nie jest w stanie wywołać zmiany struktury czy też wzbudzenia biomolekuł.

Tabela 1. Długości fali (λ), częstotliwość (ν) i energia kwantów (E) dla różnych typów promieniowania.

Promieniowanie	λ (m)	ν (Hz)	E (eV)
RF EMF	0.6	$0.5 \cdot 10^9$	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$
RF EMF	0.06	$5 \cdot 10^9$	$\sim 2 \cdot 10^{-5}$
Fale milimetrowe	10^{-3}	$3 \cdot 10^{11}$	10^{-3}
VIS	$\sim 6 \cdot 10^{-7}$	$\sim 5 \cdot 10^{14}$	~ 2
UV	$\sim 3 \cdot 10^{-16}$	$\sim 10^{16}$	~ 40
Promieniowanie X	$\sim 3 \cdot 10^{-12}$	$\sim 10^{20}$	$\sim 4 \cdot 10^4$

Tabela 2. Energie (E) wiązań chemicznych i wartość energii termicznej (kT).

Typ wiązania	E (eV)
Kowalencyjne	2.2-4.8
Van der Waalsa	0.08-0.4
Wodorowe	0.13-0.30
Jonowe (w H ₂ O)	0.2
kT (310 K)	0.027

Możliwe oddziaływanie RF EMF na układy biologiczne może polegać jedynie na występowaniu efektów złożonych. Wiele tego typu efektów zostało zaproponowanych w oparciu o rozważania teoretyczne lub eksperymenty laboratoryjne. Kilka przykładów zostanie omówionych poniżej. Jednym z możliwych efektów jest złożony mechanizm prowadzący do modyfikacji szybkości dyfuzji w środowisku wodnym. Mechanizm działania RF EMF opiera się na założeniu, że w wyniku naświetlania zwiększa się energia kinetyczna w ruchu obrotowym cząsteczek. Jednocześnie nie ulega zmianie chaotyczny ruch translacyjny (ruchy Browna) i tym samym energia ruchów termicznych (temperatura układu). Dodatkowo, w żywych organizmach małe wzrosty temperatury (< 1 K) mogą być łatwo kompensowane przez procesy transportu ciepła i termoregulacji. Wzrost energii rotacyjnej może spowodować zarówno reorientację i rozrywanie wiązań wodorowych między cząsteczkami wody. W rezultacie wywołuje to zmiany współczynnika dyfuzji z powodu zmian współczynnika lepkości. Hinricus et al. [26] dowiódł eksperymentalnie, że naświetlając roztwór fizjologiczny (0.9% NaCl) można modyfikować szybkość dyfuzji.

Innym postulowanym efektem jest modyfikacja potencjałów elektrycznych w organizmie człowieka. Powszechnie wiadomo, że potencjały elektryczne w organizmie (potencjał czynnościowy, EKG, EEC, EMG, itp.) charakteryzują się niskimi częstotliwościami (< 1 kHz). Naturalnym jest, że obserwujemy działanie na organizm promieniowania EM,

o odpowiedniej intensywności, w tym zakresie częstotliwości. W postulowanym efekcie, RF EMF jest traktowane, jako częstotliwość nośna dla wprowadzenia sygnału niskiej częstotliwości do układu biologicznego. Dla zaobserwowania działania RF EMF w układzie biologicznym musi oczywiście istnieć mechanizm demodulacji. Efekt ten próbowano wykorzystać, na przykład, dla wyjaśnienia działania na ludzki mózg RF EMF [27]. Naświetlenia przeprowadzono w układzie laboratoryjnym natomiast do oceny efektów wykorzystano funkcjonalną tomografię rezonansu magnetycznego.

Kolejny możliwy mechanizm działania RF EMF na układy biologiczne oparty jest o zjawisko rezonansu stochastycznego [28]. Rezonans stochastyczny jest to zjawisko polegające na wzmocnieniu sygnału, który normalnie jest zbyt słaby dla wywołania efektu, przez dodanie do sygnału szumu zawierającego szerokie spektrum częstotliwości (szum biały). Przy spełnieniu pewnych warunków, częstotliwości w szumie odpowiadające oryginalnym częstotliwością sygnału będą rezonansowo wzmocniane natomiast pozostałe częstotliwości w szumie nie ulegną zmianie. Rezonans stochastyczny zaobserwowano w tkance nerwowej układów sensorycznych kilku organizmów. Należy podkreślić, że zaobserwowano także odwrotny rezonans stochastyczny w eksperymencie *in vitro* wykonanym na aksonie kałamarnicy.

Wyżej wymienione efekty nietermiczne należy traktować, jako przykłady możliwych skutków działania RF EMF na układy biologiczne. Kilka innych przykładów jest opisanych w literaturze. Dla opisu działania RF EMF na układy biologiczne nie opracowano do tej pory jednej powszechnie akceptowanej teorii. Wyniki eksperymentów są interpretowane na gruncie różnych modeli biofizycznych. Nie można także wykluczyć, że najbardziej znaczącą rolę ekspozycji RF EMF jest zintensyfikowanie efektów ekspozycji na inne czynniki fizyczne lub chemiczne. Należy również zauważyć, że jeśli skutki biologiczne działania RF EMF zostaną potwierdzone, pozostaje problem, czy stanowi to zagrożenie dla człowieka. Zagrożenie można traktować, jako prawdopodobieństwo wystąpienia efektu negatywnego na podstawie analizy statystycznej w badaniach populacyjnych lub też osiągnięcie przez człowieka pewnego poziomu dyskomfortu wskutek działania danego czynnika. Istotnym jest także rozróżnienie, jakie gęstości mocy RF EMF powodują uszkodzenie układu biologicznego a dla jakich gęstości występuje dyskomfort bez potwierdzonych skutków patofizjologicznych. Obserwowane efekty działania RF EMF nie muszą koniecznie stanowić zagrożenia dla organizmu a wręcz wybrane efekty mogą być korzystne dla organizmu. Promieniowanie EM jest przecież stosowane do celów diagnostycznych i terapeutycznych od wielu lat. Należy jednoznacznie stwierdzić, że ocena potencjalnych skutków nietermicznych działań RF EMF na organizm człowieka nadal pozostaje sprawą otwartą a problem wymaga dalszych badań.

3. Wpływ RF EMF na zdrowie człowieka

Na wstępie należy podkreślić, że nie istnieją jednoznaczne dowody naukowe na pozytywne lub negatywne oddziaływanie RF EMF na organizmy żywe. W środowisku

naukowym istnieją duże rozbieżności, co do interpretacji wyników badań prowadzonych w tej dziedzinie.

W początkowych etapach rozwoju mobilnych technologii telekomunikacyjnych głównym źródłem RF EMF mogących mieć negatywne skutki dla zdrowia ludzkiego były połączenia telefoniczne. Ze względu na geometryczne relacje pomiędzy telefonem komórkowym a ciałem, główne zainteresowanie wiązało się z oddziaływaniem na okolice głowy i szyi. Wielu badaczy podnosi możliwość szkodliwego wpływu RF EMF na ośrodkowy układ nerwowy, a szczególnie mózg [2,3,6,29,30], nerw słuchowy [31], tarczycę [32], ślinianki [30,31], oczy i nerwy wzrokowe [2].

Jednym z najczęściej obserwowanych efektów napromieniowania RF EMF w badaniach *in vitro* jest szok oksydacyjny, który może prowadzić do uszkodzenia komórek, co jest szczególnie niebezpieczne w przypadku ośrodkowego układu nerwowego. Fakt ten jest silnym argumentem za istnieniem związku przyczynowego pomiędzy ekspozycją na RF EMF, a ryzykiem zachorowania na nowotwory ośrodkowego układu nerwowego, oraz ciężkie choroby neurodegeneracyjne takie jak choroba Alzheimera i choroba Parkinsona [2,6]. Z drugiej strony znaleźć można również prace opisujące korzystny wpływ na wymienione wyżej patologie [2].

Innym postulowanym mechanizmem oddziaływania omawianych pól z organizmem jest ich wpływ na funkcjonowanie kanałów wapniowych bramkowanych potencjałem (ang. voltage gated calcium chanel). Duża liczba tego typu kanałów jonowych w tkankach układu nerwowego również może przemawiać na korzyść szkodliwości RF EMF na ten ostatni. Pal w swojej pracy [33] wylicza wiele efektów pochodzenia neurologicznego, które mogą być efektem oddziaływania RF EMF. Są to: zaburzenia snu i bezsenność, bóle głowy, objawy depresyjne i depresja, zmęczenie, zaburzenie czucia, zaburzenia koncentracji i uwagi, zaburzenia pamięci, zawroty głowy, drażliwość, utrata apetytu, spadek wagi ciała, niepokój, lęk, nudności, swędzenie skóry i wreszcie zmiany w zapisie EEG. Większość z wymienionych pokrywa się z niespecyficznymi objawami zgłaszanymi również przez osoby samookreślające się, jako nadwrażliwe na pola elektromagnetyczne.

Często ekspozycję na RF EMF wiąże się z zaburzeniami funkcjonowania ośrodkowego układu nerwowego. Istnieją doniesienia opisujące upośledzenie procesu zapamiętywania i funkcji poznawczych [34], obniżenie jakości snu [35,36], nadpobudliwość, obniżenie koncentracji i zaburzenia zachowania [2,29]. Potencjalne negatywne skutki dla ośrodkowego układu nerwowego mogą być związane, poza wspomnianymi wyżej mechanizmami, ze zwiększoną przepuszczalnością bariery krew – mózg, ubytkiem liczby neuronów i komórek glejowych oraz zaburzeniami funkcjonowania neuroprzebieżników [3].

Innymi układami lub procesami, których działanie może być zaburzone poprzez RF EMF są: układ krążenia, krwiotwórczy, odpornościowy i rozrodczy, rytm dobowy, proces gojenia, jak również równowaga hormonalna i genowa [2,3,29,37]. Kolejnymi przykładami potencjalnych problemów zdrowotnych opisywanych na podstawie badań na zwierzętach lub

z udziałem ludzi są ponadto: nadpobudliwość i zaburzenia pamięci u dzieci narażonych na ekspozycję w okresie prenatalnym, zmniejszenie liczby komórek ziarnistych w zakręcie zębatym, uszkodzenie osłon mielinowych neuronów, wyższe ryzyko nowotworów mózgu, piersi i ślinianek, pogorszenie jakości spermy [30]. Można obserwować również wzrastające zainteresowanie tzw. nadwrażliwością elektromagnetyczną, ale większość autorów łączy ją z czynnikami psychologicznymi i sugeruje raczej działanie efektu nocebo [7,38].

RF EMF może wpływać na proliferację i różnicowanie komórek macierzystych [6]. Opisywane jest zarówno stymulujące jak i hamujące działanie w zależności od wielu czynników, takich jak badany system biologiczny, charakterystyka pola czy czas ekspozycji. W zbliżonym kontekście uważa się, że należy zwrócić szczególną uwagę na narażenie dzieci i młodzieży, ze względu na fakt że w rozwijające się tkanki narażone są w większym stopniu na wpływ czynników zewnętrznych [30]. Wydaje się, że pola tego typu mogą być szczególnie szkodliwe dla rozwoju mózgu, który na wczesnych etapach rozwoju charakteryzuje się wyższą absorpcją ze względu na wyższą przewodność elektryczną związaną z kolei z większą ilością wody i większą koncentracją jonów [3]. Mózgi dzieci pochłaniają więcej energii niesionej przez RF EMF niż osoby dorosłe również ze względu na cieńsze czaszki i mniejsze rozmiary ciała [30].

Niektórzy autorzy sugerują genotoksyczne działanie RF EMF które miałyby bazować na aberracjach chromosomalnych i wymianie siostrzanych chromatyd. Temat ten został szeroko i szczegółowo zanalizowany w pracy przeglądowej przez grupę pod kierunkiem Varschaeve [37]. Autorzy na podstawie analizy ponad 180 publikacji dochodzą do wniosku, że dowody na genotoksyczne działanie RF EMF są nieprzekonujące.

Większość publikowanych prac dotyczy negatywnych skutków oddziaływania RF EMF na organizm człowieka, ale jest też sporo prac, które nie negują samego wpływu pól na organizm, ale sugerują pozytywne efekty takiego oddziaływania. Opisywano na przykład zjawisko adaptacji w odpowiedzi na narażenie na RF EMF. Obserwowano zwiększoną odporność na promieniowanie jonizujące lub odporność na zakażenia bakteryjne, którą wiązano z wcześniejszą ekspozycją na PEM. Opisywano również poprawę zdolności kognitywnych u dzieci i u dorosłych [39]. Istnieją prace pokazujące, że promieniowanie takie może odgrywać pozytywną rolę w walce z zaburzeniami funkcji poznawczych w chorobie Alzheimera [2,6,7].

Do tej pory nie udowodniono w stopniu wystarczającym jakichkolwiek efektów zdrowotnych poza tymi, jakie związane są bezpośrednio z ogrzewaniem tkanek na skutek działania RF EMF [40]. Pomimo wielu zakrojonych na szeroką skalę badań epidemiologicznych nie udało się dojść do konstruktywnych wniosków na temat wzrostu ryzyka zachorowalności na nowotwory mózgu, głowy i okolic szyi na skutek zwiększonej ekspozycji na RF EMF [31,32,41-48]. Nie stwierdzono też jednoznacznie zwiększonej liczby nowotworów po tej jego stronie ciała, która zaabsorbowała większą energię promieniowania.

Ponieważ wyniki przeprowadzonych dotychczas badań kohortowych nie doprowadziły do jednoznacznych wniosków, planowane są dalsze badania tego typu. Jednym z bardziej imponujących zamierzeń jest projekt COSMOS, który rozpoczął się w roku 2011. w pięciu krajach europejskich i który zaplanowany jest na 25 lat [49]. Projekt ma objąć badaniem 250000 dorosłych uczestników w celu ustalenia związków pomiędzy używaniem telefonów komórkowych, a różnego rodzaju problemami zdrowotnymi. Ekspozycja osób badanych na RF EMF będzie szacowana na podstawie kwestionariuszy, ale mają być również brane pod uwagę ilościowe dane zebrane od operatorów sieci komórkowych. Związek ekspozycji z konkretnymi jednostkami chorobowymi ma być określany na podstawie analizy istniejących oficjalnych medycznych baz danych.

Następnym potencjalnym problemem zdrowotnym jest choroba idiopatyczna wywołana czynnikami środowiskowymi przypisywana działaniu PEM zwana powszechnie nadwrażliwością elektromagnetyczną. Zjawisko to charakteryzuje się szerokim spektrum objawów niespecyficznych zgłaszanych przez osoby samookreślające się, jako nadwrażliwe na PEM. Nie ma dostatecznych dowodów potwierdzających związek pomiędzy ekspozycją a nadwrażliwością elektromagnetyczną [40]. Mortazavi i jego grupa [7], ale również inni autorzy nie stwierdzili częstszego występowania u użytkowników telefonów komórkowych symptomów zgłaszanych przez osoby samookreślające się, jako nadwrażliwe. Większość autorów sugeruje, że w przypadku nadwrażliwości elektromagnetycznej przeważają raczej czynniki psychologiczne. Na szczególną uwagę zasługuje doniesienie grupy Eititi [50], w którym opisane są wyniki otwartego testu prowokacyjnego przeprowadzonego, jako podwójnie ślepa próba. Autorzy nie potwierdzili związku pomiędzy pogorszeniem samopoczucia osób opisujących się, jako nadwrażliwe, a rzeczywistą ekspozycją na RF EMF.

Rozległe badanie epidemiologiczne związane z tym problemem zostało przeprowadzone w Holandii. Badania zakończone w roku 2015 objęły prawie 6000 uczestników i miały na celu zbadanie potencjalnych związków między narażeniem na PEM (również w zakresie RF), a jakością snu i nadwrażliwością elektromagnetyczną [38]. Porównanie danych pacjentów samookreślających się, jako nadwrażliwi z ogólnie dostępnymi oficjalnymi rejestrami medycznymi nie wykazało istotnej korelacji pomiędzy symulowanymi ekspozycjami na RF EMF a badanymi efektami zdrowotnymi. Zaobserwowano pewne przesłanki, mogące sugerować związek pomiędzy ekspozycją a nadwrażliwością, ale korelacje te nie były istotne statystycznie. Autorzy doszli ponadto do wniosku, że postrzegana przez badanych ekspozycja nie ma nic wspólnego z rzeczywistą. Konkludują również, że to nie rzeczywista ekspozycja, ale postrzegana przez osoby opisujące się, jako nadwrażliwe jest czynnikiem decydującym o wystąpieniu symptomów nadwrażliwości elektromagnetycznej. Autorzy sugerują istnienie czynników psychologicznych w przypadku nadwrażliwości i twierdzą, że może tutaj działać efekt nocebo. Wnioski takie są zgodne z obrazem, jaki rysuje się z przeglądu literatury. Wydaje się, że nie istnieje związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy subiektywnie określanym samopoczuciem, a ekspozycją na RF EMF, bez względu na to, czy badani uważają się za nadwrażliwych na RF EMF, czy też nie.

Drugim, co do wrażliwości na czynniki środowiskowe po układzie nerwowym, jest układ rozrodczy [33]. Z tego względu kolejnym aspektem, jaki należy uwzględnić analizując wpływ RF EMF na zdrowie człowieka, jest płodność [51,52]. Należy tutaj podkreślić jeszcze jeden czynnik. Telefony komórkowe są zazwyczaj przechowywane w kieszeniach spodni a obecnie smartfony są używane częściej nie, jako telefony, lecz jako przenośne komputery lub terminale internetowe. Zmiany w rozmiarach i funkcjonalności telefonów komórkowych spowodowały zmianę relacji geometrycznych pomiędzy ludzkim ciałem i tymi urządzeniami. Mózg przestał być już w związku z tym organem najbardziej narażonym na szkodliwe działanie RF EMF, a narażenie gonad zdecydowanie wzrosło. Z tego powodu pytanie o potencjalne problemy z płodnością, które mogą być związane z oddziaływaniem RF EMF jest jak najbardziej uzasadnione.

Adams [51] i Liu [52] wraz ze swoimi współpracownikami dokonali metaanaliz doniesień naukowych dotyczących wpływu RF EMF na jakość spermy metodami *in vivo* oraz *in vitro*. Grupa Adamsa stwierdziła, że ekspozycja na pole emitowane przez telefon komórkowy wpływa negatywnie na jakość spermy w sensie obniżenia ruchliwości plemników i ich żywotności, ale nie ma wpływu na ich liczebność. Autorzy uważają, że obserwowane obniżenie jakości nasienia jest skutkiem wzrostu temperatury, a na poparcie swojej tezy przytaczają przykład, że temperatura skóry twarzy po 6cio minutowej rozmowie telefonicznej może wzrosnąć o 2.3° C. Autorzy upatrują wzrostu temperatury w dyssypacji ciepła przez telefon, a nie w bezpośrednim działaniu RF EMF na tkanki. Ciekawe wnioski płyną z pracy grupy Liu [52]. Systematyczny przegląd literatury pokazuje, że większość doniesień opisujących badania z udziałem ludzi i badania *in vitro* wykazują negatywny wpływ promieniowania pochodzącego od telefonów komórkowych na jakość nasienia, ale metaanaliza tych samych danych wykonana przez autorów nie potwierdza takiego wpływu.

Świat naukowy kieruje obecnie wysiłki głównie na uzyskanie jednoznacznych dowodów negatywnego, lub korzystnego wpływu RF EMF na ludzi. Mniej uwagi poświęca się znalezieniu fizycznych mechanizmów oddziaływania, co znajduje odzwierciedlenie w mniejszej ilości prac na ten temat, w porównaniu do liczby doniesień dotyczących bezpośrednio problemów zdrowotnych. A przecież odkrycie i potwierdzenie fizycznych mechanizmów interakcji między PEM, a ludzkim ciałem, tkankami lub komórkami pozwoliłoby rozwiązać również wątpliwości co do wpływu pól na zdrowie ludzkie [33].

4. Fizyczne i biochemiczne mechanizmy oddziaływania na poziomie komórkowym

PEM o częstotliwości do 10 GHz wytwarza ciepło na skutek absorpcji energii w penetrowanych tkankach. Głębokość penetracji jest malejącą funkcją częstotliwości. Skutki oddziaływania opisuje się w tym przypadku poprzez współczynnik absorpcji swoistej - SAR - wyrażony jako moc pochłonięta w jednostce masy tkanki (W/kg). Negatywne skutki zdrowotne u człowieka obserwowane są dla SAR powyżej 4 W/kg [2,7]. Wartość tą uważa się za dolną granicę, powyżej której mają miejsce tzw. efekty termiczne, ale wyniki wielu doświadczeń

sugerują obecność efektów biologicznych również dla niższych wartości SAR [26]. Efekty termiczne oddziaływania RF EMF na organizm są dobrze znane i opisane, ale nie są interesujące z punktu widzenia narażenia zdrowia ludzkiego ponieważ ich wystąpienie jest mało prawdopodobne przy typowych natężeniach pól w otoczeniu człowieka [37].

Niezależnie od intensywności RF EMF, w przeciwieństwie do promieniowania jonizującego, nie jest w stanie zerwać wiązań chemicznych, więc nie może prowadzić do uszkodzenia cząsteczek, w tym również DNA [31]. Dzieje się tak dlatego, że energia kwantów promieniowania jest zbyt niska w porównaniu z energią wiązań chemicznych, a częstotliwości RF EMF są zbyt wysokie w porównaniu do częstotliwości typowych dla procesów biofizycznych [26]. Fizycy przeanalizowali wiele możliwych mechanizmów interakcji takich jak deformacja cząsteczek białek, aktywacja ścieżek sygnałowych lub aktywacja receptorów w błonach komórkowych. We wszystkich przypadkach ilość energii niesiona przez fotony RF EMF jest niewystarczająca, aby bezpośrednio wywoływać efekty patologiczne [40]. Niemniej jednak, istnieje wiele prac sugerujących, że oprócz efektów termicznych można obserwować inne efekty, takie jak zmiany szybkości niektórych reakcji chemicznych, czy indukowanie prądu i pola elektrycznego w tkankach i komórkach [2,26]. Efekty te są kilka rzędów wielkości słabsze niż występujące naturalnie w organizmie człowieka [31] i wiele poczynionych obserwacji może mieć jednak związek ze wzrostem temperatury lub jest efektem ograniczeń metodologicznych [37], a nie efektów nietermicznych.

RF EMF sztucznie generowane przez urządzenia telekomunikacyjne są zazwyczaj spolaryzowane. Według niektórych autorów promieniowanie spolaryzowane jest bardziej szkodliwe dla systemów biologicznych niż niespolaryzowane. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku konstruktywnej interferencji fal spolaryzowanych lokalne wzmocnienie natężenia pola jest maksymalne. Ponadto, spolaryzowane PEM mogą wymuszać równoległe i zgodne w fazie z wektorem elektrycznym oscylacje cząsteczek polarnych lub jonów. Większość krytycznych biomolekułów jest polarna [53].

Niektóre badania doświadczalne wykazały, że ekspozycja na RF EMF w połączeniu z narażeniem na słabe i znane czynniki rakotwórcze zwiększa ryzyko powstania nowotworów i przyspiesza ich wzrost [31]. Równocześnie nie można wykluczyć możliwości, że efekty termiczne stanowią główny, o ile nie jedyny mechanizm biologiczny. Pomimo tego, że w wielu badaniach sygnalizowano możliwość istnienia efektów nietermicznych, żadne mechanizmy alternatywne do oddziaływania termicznego nie zostały jednoznacznie potwierdzone [1]. W związku z tym Światowa Organizacja Zdrowia stoi na stanowisku, że jeśli chodzi o mechanizmy oddziaływania PEM, to wszystkie efekty zdrowotne z nim związane są z konsekwencją podwyższenia temperatury.

Obserwowane i opisane potencjalne skutki biologiczne mają bardzo szeroki zakres, począwszy od wahań prędkości syntezy różnych biomolekułów, poprzez zmiany stężenia jonów w przestrzeniach międzykomórkowych i wewnątrzkomórkowych, aż po uszkodzenia cząsteczek białek i DNA [31,53]. Wszystkie te efekty mogą spowodować apoptozę komórek,

obniżyć zdolności regeneracyjne tkanek lub doprowadzić do powstawania nowotworów. W przypadku badań *in vitro* bierze się pod uwagę ewentualny wpływ na kinetykę procesów komórkowych; proliferację; transdukcję sygnałów; zmiany w strukturze i przepuszczalności błon komórkowych; pośrednie hamowanie syntezy, transkrypcji i przetwarzania DNA; zaburzenia w transporcie RNA; upośledzenie cyklu komórkowego i metabolizmu komórek [2,6].

Podjezwia się, że RF EMF może niekorzystnie wpływać na wewnątrzkomórkowe szlaki sygnałowe, ale przedstawione w literaturze wyniki są niejednoznaczne. Wnioski zgłaszane przez niektórych autorów nie są potwierdzane w innych badaniach, albo uzyskuje się wyniki wręcz im zaprzeczające. Badania tego typu są wykonywane zwykle w warunkach *in vitro* z zastosowaniem ludzkich hodowli komórkowych. Brane pod uwagę mechanizmy oddziaływania związane są ze zmianami poziomu ekspresji genów zaangażowanych w naprawy DNA, zatrzymaniem cyklu komórkowego, przyśpieszeniem apoptozy i reorganizacją chromosomów [2]. Zmiany poziomu ekspresji genów wykryto na przykład w przypadku angiogenezy, ale również w przypadku różnicowania i regulacji cytoszkieletu. Ostatnia uwaga prowadzi do wniosku, że elementy architektoniczne komórek, takie jak membrana lub cytoszkielet mogą być podatne na szkodliwe działanie RF EMF. Podobnie zresztą, jak mikrotubule i wielocząsteczkowe struktury składające się z heterodimerów tubuliny, które są obecne w większości komórek eukariotycznych [2].

Stres oksydacyjny rozumiany jako brak równowagi pomiędzy procesami powstawania reaktywnych form tlenu i mechanizmami obrony antyoksydacyjnej jest jednym z potencjalnych biochemicznych mechanizmów wpływu RF EMF na organizmy żywe [29]. Jest on głównie efektem powstawania nadmiernej liczby wolnych rodników, które z kolei reagują z wieloma biomolekułami, w tym z DNA, prowadząc do zmian genetycznych, powstawania nowotworów i przyspieszonego starzenia się. Wolne rodniki mogą modyfikować DNA na różne sposoby, poprzez bezpośrednie reakcje chemiczne ze związkami wchodzącymi w skład cząsteczek DNA, poprzez zrywanie wiązań pomiędzy komplementarnymi parami zasad, lub poprzez tworzenie dodatkowych wiązań. Tego typu uszkodzenia są kompensowane poprzez odpowiednie mechanizmy komórkowe, o ile nie jest ich zbyt wiele. Nie wszystkie wolne rodniki wpływają negatywnie na stan komórki, ponieważ są one produkowane również w trakcie procesów fizjologicznych, ale ich nadmiar może prowadzić do poważnych jej uszkodzeń. Warto podkreślić, że RF EMF nie może bezpośrednio powodować powstawania wolnych rodników, a jego ewentualne działanie niekorzystne może polegać na wydłużeniu czasu życia już istniejących.

Stres oksydacyjny może powodować m.in. uwalnianie reaktywnych aminokwasów i może prowadzić do zaburzenia równowagi wapnia [3]. W normalnych warunkach stężenie jonów wapnia jest mniejsze wewnątrz komórek, niż w przestrzeni międzykomórkowej. Jeśli rośnie poziom wolnych rodników, to może dojść do uszkodzenia mitochondriów i w efekcie nastąpi wzrost poziomu jonów wapnia w komórce. Następnie funkcjonowanie struktur

błoniastych może zostać zaburzone prowadząc do wzrostu poziomu syntazy tlenku azotu i fosfolipazy A2, a w konsekwencji może dojść nawet do uszkodzenia komórki. Wpływ wolnych rodników na homeostazę wapnia może tłumaczyć pośrednio wpływ PEM na funkcjonowanie pamięci. Prawdopodobny mechanizm takiego oddziaływania może polegać na interakcji z komórkami piramidalnymi hipokampu [2], których pobudzenie jest regulowane przez równowagę wewnątrz- i zewnątrzkomórkowego poziomu wapnia.

Najczęściej biochemiczne mechanizmy wpływu RF EMF opisywane są w odniesieniu do centralnego układu nerwowego i są one związane z pojawieniem się stresu oksydacyjnego, prowadzącego do neurodegeneracji [2,3,6]. Wzrost poziomu wewnątrzkomórkowego tlenku azotu po ekspozycji na PEM może aktywować zwiększoną produkcję syntazy tlenku azotu. To z kolei, pośrednio poprzez szlaki sygnałowe CaM/NO/cGMP oraz CaM/NO, może modyfikować odpowiedź na stan zapalny i niedokrwienie, wpływając ostatecznie na zdolność mózgu do przywracania funkcji po urazach. Stres oksydacyjny może być również ważnym czynnikiem w przypadku niekorzystnego działania na obwodowy układ nerwowy, tym bardziej, że w tym przypadku dodatkowo zakłócone jest funkcjonowanie układu odpornościowego, gdyż jednojądrzaste komórki krwi obwodowej są elementem układu odpornościowego i są również zaangażowane w procesy starzenia i neurodegeneracji. RF EMF może indukować zmiany w ekspresji lipidów i białek, prowadząc do produkcji reaktywnych form tlenu i apoptozy poprzez zmniejszenie spadku potencjału na błonie mitochondrialnej [2].

Oddziaływanie RF EMF na ośrodkowy układ nerwowy może odbywać się również poprzez osłabienie bariery krew-mózg bez równoczesnego uszkodzania neuronów [2,6], albo też poprzez zaburzenia produkcji melatoniny [2]. Melatonina jest ważnym regulatorem snu i fizjologii mózgu w ogóle, więc prace opisujące niekorzystny wpływ PEM na jakość snu mogą być dowodem na istnienie tego typu mechanizmu [35,36]. Innym elementem związanym z funkcjonowaniem układu nerwowego są synapsy. Uważa się, że upośledzenie procesu uczenia się i zapamiętywania może być spowodowane zaburzeniami w funkcjonowaniu synaps. Publikowano wyniki badań, w których stwierdzano tego typu efekty po ekspozycji na RF EMF [3].

Jak już wspomniano wcześniej jednym ze sposobów w jaki PEM może wpływać na organizm jest działanie na kanały wapniowe bramkowane potencjałem, które znajdują się w błonach komórkowych [33,54]. Według niektórych badaczy oddziaływanie takie zostało udowodnione poprzez stosowanie substancji blokujących działanie kanałów wapniowych. Po ich zastosowaniu obserwowane skutki działania pola były ograniczone, albo nie występowały w ogóle. Teki mechanizm byłby szczególnie istotny w przypadku układu nerwowego, gdzie kanały wapniowe bramkowane potencjałem występują bardzo często i odgrywają znaczącą rolę w procesie uwalniania neurotransmiterów i hormonów neurodokrewnych. Zwolennicy istnienia takiego mechanizmu na poparcie swoich wniosków przytaczają terapeutyczne zastosowanie PEM w leczeniu kości, gdzie używa się go do stymulacji procesu gojenia [54].

Pall [54] w swojej pracy opisuje konsekwencje istnienia mechanizmu oddziaływania pola na kanały wapniowe. Zwiększenie stężenia wewnątrzkomórkowego Ca^{2+} będące efektem aktywacji kanałów wapniowych może spowodować zwiększenie stężenia tlenu azotu pod wpływem działania neuronowej albo śródbłonkowej syntazy tlenu azotu. W warunkach fizjologicznych wyższy poziom tlenu azotu prowadzi do zwiększonej syntezy cyklicznego monofosforanu guanozyny i dalszej aktywacji kinazy białkowej G. Taki efekt mógłby być odpowiedzialny za korzystne efekty działania pola, takie jak stymulacja osteoblastów i wzrost kości. W sytuacji patologicznej tlenek azotu tworzy nadtlenoazotyn oraz nadtlenek wodoru. Nadtlenoazotyn jako silny utleniacz generuje z kolei wolne rodniki, takie jak grupa wodorotlenowa, czy NO_2 .

5. Przyczyny niejednoznacznej oceny wpływu RF EMF na zdrowie

Jak wynika z poprzednich rozdziałów istnieją duże rozbieżności w środowisku naukowym co do wpływu RF EMF na organizm człowieka. Największe wady publikowanych doniesień naukowych, które mogą być przyczyną takiej sytuacji są wymienione w pracy przeglądowej stworzonej przez grupę Verschaeve [37]: niewłaściwa dozymetria i/lub kontrola temperatury; różnice w stosowanych częstotliwościach, intensywnościach, SAR, współczynnikach absorpcji, sposobach modulacji sygnału, czasie trwania ekspozycji, charakteru ekspozycji (ciągła/przerywana). Często nie bierze się pod uwagę różnic w analizowanych układach biologicznych, czy też fizjologii badanego organizmu w odniesieniu do homeostazy i mechanizmów regulacyjnych. Stosuje się niepoprawne protokoły badań lub niewłaściwie dobrane metody badań laboratoryjnych. Nie uwzględnia się różnic pomiędzy poszczególnymi laboratoriami porównując ich wyniki. Prezentuje się wyniki o niewystarczającej mocy statystycznej, albo interpretuje się je niewłaściwie. Pomimo ogromnego postępu w dziedzinie badań naukowych większość z wymienionych problemów nadal stanowi poważne wyzwanie.

5.1. Ocena narażenia

Największą wadą prac przeprowadzanych z udziałem ludzi jest brak wiarygodnej i profesjonalnej oceny ekspozycji [37]. Do tej pory nie została jednoznacznie określona metodologia pozwalająca na oszacowanie rzeczywistego narażenia na promieniowanie RF EMF. Szczególnie w przypadku starszych badań niewłaściwe określenie zaabsorbowanej energii sprawia, że ich wyniki są mało wiarygodne [40]. Pomiary ekspozycji są niezwykle trudne ze względu na wysoką zmienność przestrzenną i czasową natężenia PEM [55]. Oszacowanie maksymalnej ekspozycji jest zależne od przyjętej metodologii, a bezkrytyczne stosowanie standardowo przyjętych metod często prowadzi do niedoszacowania narażenia. Istnieją różne rozwiązania stosowane w praktyce do oceny ekspozycji. Może ona być mierzona, obliczona z wykorzystaniem modeli matematycznych lub szacowana na podstawie wywiadu przeprowadzanego z osobami zaangażowanymi w eksperyment.

Ekspozycjometria jest największym problemem w badaniach epidemiologicznych. Zwykle w tego rodzaju eksperymentach stosuje się skierowane do uczestników kwestionariusze i na

ich podstawie określa się narażenie na PEM. Może to być źródłem poważnych błędów w oszacowaniu ekspozycji. Postrzeganie ryzyka związanego z ekspozycją na RF EMF opiera się intuicyjnym postrzeganiu wielkości tej ekspozycji [56,57,58]. Z kolei wielkość ekspozycji postrzegana przez respondentów różni się od jej rzeczywistej wielkości [38]. Ludzie używają prostych algorytmów heurystycznych postrzegając narażenie na RF EMF. Wyższe ryzyko wydaje się być związane z fizycznie większymi źródłami pola oraz dłuższym i częstszym naświetlaniem. Jest to jeden z powodów, dla których ludzie nie akceptują stacji bazowych telefonii komórkowych w ich środowisku, ale nie postrzegają swoich telefonów jako stwarzających zagrożenie dla ich zdrowia. W istocie zagrożenie ze strony promieniowania emitowanego przez telefon jest znacznie większe, niż ze strony emisji od stacji bazowej [56]. Wiedza na temat problemów związanych z RF EMF jest znikoma. Np. około 40% społeczeństwa nie zdaje sobie sprawy z tego, że telefony komórkowe i stacje bazowe są źródłem PEM, ale większość twierdzi, że ich odbiorniki telewizyjne są [56]. Kolejnym ciekawym spostrzeżeniem jest fakt, że jakość wiedzy respondentów na temat zagrożeń promieniowaniem nie ma wpływu na poprawne intuicyjne szacowanie wielkości ekspozycji, wpływa natomiast na postrzeganie ryzyka [56].

Innym podejściem jest użycie informacji o lokalizacjach stacji bazowych do szacowania narażenia ludności na ekspozycję. Problem ten został opisany w pracy oryginalnej przez grupę badawczą Gonzales-Rubio [59]. Badacze stworzyli mapę średniej ekspozycji dla hiszpańskiego miasta Albacete (około 170 000 mieszkańców) na podstawie pomiarów wykonanych przy pomocy ekspozycjometrów osobistych. Mapa średniej ekspozycji była następnie skonfrontowana z informacjami o lokalizacjach stacji bazowych w badanym obszarze. Wyniki wykazały, że rozkład stacji bazowych reprezentuje zupełnie inny wzorzec niż rozkład średniej ekspozycji, który jest bardzo przypadkowy. Ekspozycja uśredniona dla poszczególnych regionów administracyjnych miasta nie korelowała z gęstością stacji bazowych w tych regionach. Autorzy doszli do wniosku, że najczęstsze podejście stosowane w badaniach epidemiologicznych, polegające na oszacowaniu narażenia w oparciu o rozkład anten nie jest właściwe i prowadzi do znacznych błędów w szacowaniu prawdziwego narażenia. Metodologia taka powinna być, ich zdaniem, zastąpiona metodologią opartą o prawdziwe pomiary ekspozycji.

Wzrost mocy obliczeniowej komputerów i dostępność wyników pomiarów ekspozycji dają kolejną możliwość oceny narażenia populacji. Do obliczania przestrzennego rozkładu ekspozycji można zastosować modelowanie numeryczne. Przydatność takiego rozwiązania testowano poprzez porównanie rozkładu ekspozycji pochodzącego od stacji bazowych przewidywanego przez model numeryczny z wynikami pomiarów [5]. Niestety korelacja pomiędzy przewidywaniami modelu i wynikami rzeczywistych pomiarów okazała się słaba. Współczynnik korelacji Spearmana wyniósł 0,36. Uzyskano stosunkowo wysoką specyficzność (0,9) przy niezadowalającej czułości (0,3). Przykład ten pokazuje, że należy sceptycznie podchodzić do metodologii bazującej na komputerowym modelowaniu przestrzennego rozkładu ekspozycji w badaniach epidemiologicznych.

Pomimo to, rozwiązania oparte na modelowaniu przestrzennego rozkładu ekspozycji na PEM stają się powoli standardem w szacowaniu narażenia ludności [60,61]. Rozkład przestrzenny ekspozycji można symulować numerycznie przy pomocy modeli matematycznych, ale jakość wyników zależy w dużym stopniu od dokładności danych wejściowych modelu. Beekhuizen wraz ze swoją grupą badał wpływ niepewności parametrów wejściowych modelu na jego wyniki [60]. Autorzy testowali rozbieżności pomiędzy wynikami prawdziwych pomiarów ekspozycji i przewidzianymi na podstawie modelu numerycznego w przypadku modelowania rozkładu emisji pochodzącej od stacji bazowej telefonii komórkowej. Zaobserwowano duże rozbieżności, mediana współczynnika zmienności wyniosła 1.5. Czynniki generującymi największe błędy w przewidywaniach modelu były: wysokość punktów pomiarowych, współczynniki pochłaniania fali przyjęte dla budynków i wysokość budynków. Mniejsze znaczenie miały niedokładności w opisie parametrów anteny takich jak moc, nachylenie, wysokość i kierunek.

Kolejną metodą szacowania prawdziwej ekspozycji jest jej pomiar w miejscach, gdzie ludzie spędzają czas (domy, biura, szkoły itp.) [4] i określenie dawki na tej podstawie i na podstawie aktywności osób przebywających w tych miejscach. Można to zrobić w zależności od celu badania przy użyciu prostych osobistych ekspozycjometrów, lub bardziej zaawansowanych urządzeń pozwalających na analizę spektralną. W obydwu przypadkach należy jednak wziąć pod uwagę ogromną zmienność czasową i przestrzenną badanych wielkości. Niestety, jak pokazano w jednym z eksperymentów, nawet kategoryzacja ludności na podgrupy w celu przeprowadzenia analizy statystycznej może powodować poważne błędy w ocenie narażenia [62]. Najlepszym rozwiązaniem jest pomiar przy użyciu osobistych ekspozycjometrów noszonych przez badane osoby, ponieważ takie podejście pozwala na uwzględnienie zmienności czasowej i przestrzennej ekspozycji [62].

Istotnym problemem związanym z pomiarami ekspozycji na RF EMF jest fakt, że zawsze mamy do czynienia z promieniowaniem bezpośrednio pochodzącym od źródła, ale też z promieniowaniem rozproszonym w badanym środowisku. Co więcej, ludzkie ciało również wpływa na wyniki pomiarów w swoim otoczeniu. Efektem tego jest zwykle niedoszacowanie ekspozycji, na którą narażony jest człowiek. Zagadnienia te zostały poruszone w pracy [63], w której autorzy sugerują konieczność kalibrowania ekspozycjometrów osobistych na ciele badanego w komorach bezechowych, jak również w komorach odbiciowych. Autorzy wykazali, że urządzenia kalibrowane na ludzkim ciele w komorach odbiciowych wykazują 7.6 razy wyższe gęstości mocy niż te same urządzenia kalibrowane w tych samych warunkach, ale bez obecności człowieka. Urządzenia kalibrowane w komorze bezechowej dają średnio 2.2 razy wyższe wyniki, niż takie same urządzenia kalibrowane w komorze odbiciowej.

5.2. Eliminacja efektów termicznych

W eksperymentach nastawionych na badanie efektów nietermicznych poza ekspozycją należy również bardzo precyzyjnie kontrolować temperaturę w celu eliminacji efektów termicznych. Tylko takie podejście gwarantuje, że obserwowane skutki można przypisać

oddziaływaniom nietermicznym [37]. Panuje powszechne przekonanie, że w większości starych prac (do lat osiemdziesiątych) wyniki eksperymentów badających wpływ RF EMF na organizmy żywe były raczej efektem wzrostu temperatury niż skutkiem oddziaływań nietermicznych ze względu na niewystarczającą kontrolę temperatury [1]. Nawet w przypadku niezbyt intensywnego pola wzrost temperatury może być znaczący. Przykładowo, symulowany komputerowo wzrost temperatury w modelu głowy przy SAR wynoszącym 2 W/kg zależy od częstotliwości PEM i może osiągnąć dla skóry 0.5°C przy 400 MHz i 0.2°C przy 900 MHz. Obliczony wzrost temperatury kości czaszki może wynieść 0.1°C przy 400 MHz i 0.2°C przy 900 MHz [35]. Rozmowa z użyciem telefonu komórkowego trwająca 15-30 minut może spowodować wzrost temperatury skóry policzka i ucha aż o 2.5-5.0°C. Przy czym w tym ostatnim przypadku wzrost temperatury przypisuje się raczej dyssypacji energii termicznej z urządzenia, podczas, gdy napromieniowanie RF EMF nie ma większego znaczenia [35,64].

Ponieważ nawet słabe efekty cieplne związane z RF EMF inicjują mechanizm odpowiedzi na szok cieplny, to badania efektów nietermicznych z wykorzystaniem elementów tego mechanizmu są problematyczne [65]. Raczej brak objawów szoku cieplnego wydaje się naturalnym sposobem identyfikacji nietermicznego wpływu RF EMF. Należy jednoznacznie zdefiniować próg, powyżej którego mamy do czynienia z mechanizmem szoku cieplnego, ale dużym wyzwaniem jest również osiągnięcie warunków izotermicznych w trakcie ekspozycji na RF EMF w warunkach rzeczywistych [65]. Powinno się zapewnić jednorodność rozkładu temperatury w całej próbce, co jest trudne do osiągnięcia, gdy weźmie się pod uwagę wyższe częstotliwości fal i skomplikowany przestrzenny rozkład gęstości mocy.

Istnieją trzy strategie, badania efektów nietermicznych [65]. Pierwszą jest termostatyczna regulacja temperatury napromieniowanej próbki. Rozwiązanie to jest możliwe tylko dla badań *in vitro*. Regulację temperatury należy przeprowadzić z dużą starannością, gdyż jej wzrost o 0.2°C jest wystarczający, aby stężenie czynników charakterystycznych dla wystąpienia szoku cieplnego wzrosło o około 15% [65]. Z drugiej strony stabilność temperatury w eksperymentach wykonywanych w warunkach *in vitro* szacowana jest na poziomie około 0,3°C. Drugie podejście opiera się na wykorzystaniu dwóch próbek, z których jedna jest naświetlana RF EMF, a druga jest podgrzewana przy pomocy innych metod w tym samym zakresie temperatury, co pierwsza. Różnice pomiędzy próbkami można wtedy uznać za wynik działania efektów nietermicznych. Ostatnią strategią jest naświetlanie dwóch identycznych próbek przy SAR na poziomach nietermicznym i termicznym (np. odpowiednio 1-2 W/kg oraz 10-20 W/kg) z pełną kontrolą średniej temperatury próbek.

5.3. Standaryzacja badań

Jakość prac opisujących problem oddziaływania RF EMF na organizmy żywe jest bardzo zróżnicowana. Zwykle autorzy podają informację o stosowanych przez nich częstotliwościach i tylko niektórzy biorą pod uwagę jakieś inne parametry opisujące parametry ekspozycji (np. gęstość mocy). W bardzo ograniczonej liczbie badań opisano dokładnie pełną listę parametrów niezbędnych do oceny narażenia, umożliwiając tym samym odtworzenie swoich

wyników przez innych naukowców. Istnieje wiele parametrów, które mogą być istotne np. modulacja, geometria przestrzenna eksperymentu, przestrzenny rozkład pola, polaryzacja, zastosowana technika pomiaru ekspozycji i czas trwania naświetlania. Również fakt, czy naświetlanie odbywa się w sposób ciągły, czy w innym reżimie czasowym, może decydować o odpowiedzi systemu biologicznego. Ważna jest ponadto charakterystyka badanego obiektu. Przykładowo w eksperymentach *in vitro* istotny jest stan, w jakim znajduje się hodowla komórkowa, gdyż komórki aktywne stale usuwają powstające uszkodzenia DNA [1,2,29].

Poza innymi czynnikami, przyjęta metodologia zbierania danych i ich opracowania może wprowadzać do eksperymentu zmienne, które mogą z kolei wpływać na ostateczne wnioski. Np. próbki nie zawsze są ekranowane przed działaniem innych niż badane źródła PEM, albo też innych czynników mogących wpływać na wyniki obserwacji [1]. Staranne stosowanie się do ustalonych i uznanych protokołów badawczych jest kluczem do uzyskania wiarygodnych danych i właściwej ich interpretacji [2].

Znakomicie problem potrzeby standaryzacji badań ilustruje praca Liu [52]. Autorzy przeprowadzili analizę sześciu prac z udziałem ludzi, pięciu badań *in vitro* i siedmiu badań na zwierzętach dotyczących związków pomiędzy RF EMF i jakością nasienia. Autorzy zwracają uwagę na różnice w jakości analizowanych prac. Za najważniejsze wady większości prac uznają brak odniesienia się ich autorów do potencjalnych czynników mogących wpływać niewłaściwie na ich wnioski oraz nieracjonalność urządzeń stosowanych do generowania pola. Co więcej sami wskazują na potencjalne źródło wpływające na ich własne wnioski polegające na tym, że wyniki eksperymentów pokazujących pozytywne wyniki są łatwiejsze do opublikowania (w tym przypadku, przez pozytywny wynik należy rozumieć wykazanie szkodliwego działania pola na jakość nasienia). Myśl tą wydaje się potwierdzać jeden z wniosków zawarty w pracy przeglądowej Cucurachi [1], w której autorzy zauważają ciekawą zależność. Analiza impact factor czasopism, gdzie artykuły na temat oddziaływania RF EMF były publikowane, pokazuje średnio wyższy wynik dla badań, niewykazujących wpływu pola (IF = 2,45) w przeciwieństwie do badań, które wykazują jego szkodliwe działanie (IF = 2,08). Sugeruje to niższą jakość prac przedstawiających szkodliwy wpływ RF EMF.

Szczególną uwagę należy zwrócić uwagę na badania promieniowania pochodzącego od telefonów komórkowych i stacji bazowych telefonii komórkowej. Niejednoznaczność wyników badań dotyczących tej problematyki jest zdaniem niektórych autorów spowodowana sposobem w jaki symuluje się emitowane pola w tego typu eksperymentach. Panagopoulos i jego współpracownicy [66] sugerują, że takie eksperymenty powinny być wykonywane z zastosowaniem rzeczywistych urządzeń, a nie poprzez symulowanie pól przy pomocy generatorów lub telefonów testowych. Zdaniem autorów istnieje duża różnica między rzeczywistą emisją telefonów i stacji bazowych a symulowanymi w sposób sztuczny w części eksperymentów. Rzeczywiste emisje są bardzo zmienne w czasie i z tego powodu są biologicznie bardziej niebezpieczne. Żywe organizmy są bowiem mniej odporne na czynniki środowiskowe o dużej zmienności. Autorzy sugerują ponadto, że duża liczba eksperymentów

wyeliminuje problem oszacowania narażenia, który występuje w przypadku stosowania urządzeń rzeczywistych (jak wspomniano wcześniej pojawia się problem rzetelnej oceny ekspozycji w tego typu eksperymentach). Autorzy wydają się jednak nie zauważać prostego faktu, że wszystkie eksperymenty epidemiologiczne uwzględniają ekspozycje pochodzące od rzeczywistych urządzeń działających w środowisku analizowanej populacji.

5.4. Ekstrapolacja wyników modeli komórkowych i zwierzęcych na ludzi

Istnieją trzy rodzaje metod stosowanych w badaniach wpływu RF EMF na ludzi [2,37]. Są to badania w warunkach *in vitro* z zastosowaniem hodowli komórkowych, badania *in vivo* na zwierzęcych i badania epidemiologiczne na populacjach ludzkich. Każde z tych podejść ma pewne wady i zalety.

Wnioski z badań modeli komórkowych nie mogą być bezpośrednio używane w odniesieniu do tych samych komórek działających w obrębie tkanek/organizmu. Dzieje się tak, ponieważ mechanizmów obronnych tkanki, albo całego organizmu nie można odtworzyć w warunkach hodowli komórkowych. Z drugiej strony takie metody znakomicie nadają się do badania podstawowych mechanizmów interakcji, gdyż umożliwiają kontrolę wielu zmiennych. Mogą one przyczynić się do oceny toksyczności i ryzyka na poziomie komórkowym, ale bez dodatkowych badań na zwierzętach i ludziach nie można wyciągać wprost wniosków dotyczących wpływu na człowieka [2,37].

Jednym z problemów, które powodują, że wnioski z badań z wykorzystaniem hodowli komórkowych należy wyciągać bardzo ostrożnie, jest trudność w uzyskaniu w takich warunkach jednorodnego rozkładu temperatury. Większość ludzkich tkanek charakteryzuje się stosunkowo wysoką przewodnością cieplną, co sprawia, że mało prawdopodobne jest uzyskanie znacznego lokalnego wzrostu temperatury np. na skutek interferencji fal. Sytuacja w warunkach hodowli komórkowej jest inna. Ograniczona dyfuzja w naczyniach stosowanych do hodowli i fakt, że komórki namnażają się w pojedynczych warstwach może prowadzić do znacznych lokalnych wzrostów temperatury. Bez kontroli jednorodności temperatury trudne jest w tym przypadku odróżnienie efektów termicznych i nietermicznych [65].

Badania z zastosowaniem modeli zwierzęcych pozwalają na badanie całego organizmu w polu, co pozwala uwzględnić wszystkie skutki działania badanego czynnika na organizm. Poza odpowiedziami układu immunologicznego, sercowo-naczyniowego, nerwowego itd. można również oceniać zmiany behawioralne [37]. Niestety wyniki również w tym przypadku nie mogą być bezpośrednio ekstrapolowane na ludzi z powodu różnic międzygatunkowych [1]. Istnieją różnice w fizjologii i metabolizmie, a nawet rozmiar ciała odgrywa ważną rolę, gdyż determinuje ilość zaabsorbowanej przez organizm energii [37].

Badania epidemiologiczne wykonywane z wykorzystaniem ludzkich populacji umożliwiają bezpośrednie badania oddziaływania RF EMF na człowieka, ale pojawiają się tutaj inne problemy. Najtrudniejszymi wyzwaniem są: ocena rzeczywistej ekspozycji oraz

eliminacja innych, nieznanych czynników środowiskowych oddziałujących na populację równocześnie z badanym czynnikiem [37,59].

5.5. Eliminacja innych czynników środowiskowych

Znaczącym wyzwaniem jest eliminacja innych czynników niż RF EMF, które oddziałują równocześnie mogąc wpływać na zdrowie społeczeństwa, a narażenie na nie zwiększa się w czasie podobnie, jak narażenie na pola. Dobrym przykładem jest tutaj zachorowalność na raka tarczycy analizowana przez Carlberga i jego zespół [32]. Wnioski na temat relacji pomiędzy wzrostem zachorowalności na tego typu nowotwory w ostatnich latach, a wzrostem ekspozycji na RF EMF należy wyciągać bardzo ostrożnie. Autorzy zauważyli, że nie tylko ekspozycja na RF EMF rosła znacząco w ostatnich dziesięcioleciach, ale również narażenie na promieniowanie jonizujące. Dzieje się tak głównie przez coraz większą dostępność procedur diagnostycznych działających w oparciu o promieniowanie jonizujące, takich jak tomografia komputerowa, pozytonowa tomografia emisyjna, czy radiologia stomatologiczna. Szacuje się, że obecnie 50-80% całkowitej dawki promieniowania jonizującego w populacji ludzkiej pochodzi od procedur medycznych. Przykładowo liczba badań z zastosowaniem pozytonowej tomografii komputerowej wykonywanych w Szwecji wzrosła trzykrotnie w latach 2006 - 2013 [32]. Zachorowalność na raka tarczycy jest ściśle związana z ekspozycją na promieniowanie jonizujące, a istnieją również inne czynniki ryzyka związane ze środowiskiem człowieka, jak na przykład zanieczyszczenia chemiczne. Poprawa jakości opieki medycznej i wzrost dostępności nowoczesnych procedur diagnostycznych może być źródłem błędów w badaniach epidemiologicznych nie tylko ze względu na wzrost narażenia na promieniowanie jonizujące. W wielu przypadkach rosnące ryzyko niektórych problemów zdrowotnych jest tylko pozorne [32], a wzrost liczby obserwowanych przypadków może być często przypisany tym właśnie czynnikom.

Przykład reakcji alergicznej na promieniowanie RF EMF jest również dobrym przykładem ilustrującym konieczność eliminacji innych współistniejących czynników środowiskowych. Niektórzy autorzy uważają, że stwierdzenie degranulacji mastocytów po ekspozycji na RF EMF u osób nadwrażliwych elektromagnetycznie [67] jest jednoznacznym dowodem na związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy PEM, a nadwrażliwością. W rzeczywistości wszystkie reakcje alergiczne są oparte na degranulacji mastocytów i tylko eliminacja wszystkich alergenów z otoczenia osób badanych pozwoliłaby na jednoznaczne potwierdzenie tego związku.

W przypadku badań dotyczących ekspozycji na RF EMF, pochodzącego z różnych urządzeń, ale w szczególności z telefonów komórkowych należy wziąć pod uwagę jeszcze jeden czynnik. Słuchawka telefonu komórkowego jest nie tylko źródłem RF EMF, ale jednocześnie emituje PEM o niskiej częstotliwości [68] i promieniowanie podczerwone. Pomiary wykonywane dla 47miu popularnych modeli telefonów komórkowych wykazały, że średnia geometryczna maksymalnej gęstości strumienia magnetycznego w odległości 25 mm od urządzeń wyniosła 221 nT (zakres 117 – 419 nT) dla częstotliwości 217 Hz. Sugeruje to

konieczność uwzględnienia wpływu zanieczyszczenia widma składowymi z innych zakresów niż RF.

5.6. Konieczność badań interdyscyplinarnych

Jednym z powodów, wyjaśniających dlaczego problem oddziaływania PEM na zdrowie budzi nadal kontrowersje i jest do tej pory w pełni nierozwiązany jest prosty fakt, że jest to problem interdyscyplinarny. Urządzenia techniczne (telefon) generując zjawiska fizyczne (RF EMF) oddziałują na systemy biologiczne (komórka organizmu) poprzez wpływ na pewne reakcje chemiczne (np. wydłużenie czasu życia grup hydroksylowych). Wiedza z różnych dziedzin musi być zintegrowana w celu rozwiązania tak złożonego problemu.

Analizując doniesienia literaturowe wyraźnie widać, że specjaliści z jednej dziedziny nie doceniają bardzo często konieczności uwzględniania wiedzy z innych dziedzin, nawet jeśli ma ona niekiedy fundamentalne znaczenie. Jest to źródłem wielu problemów i nieporozumień. Dobrym przykładem jest częsty brak fizycznego opisu stosowanych pól w pracach publikowanych przez biologów, lub lekarzy. Badaczom z dziedzin biomedycznych zazwyczaj brak wiedzy o dozymetrii. W rezultacie starsze badania są mało wiarygodne. Niewłaściwa kontrola temperatury i brak informacji dozymetrycznych powodowały, że eksperymenty były przeprowadzane najprawdopodobniej w warunkach termicznych, mimo, że autorzy wyciągali wnioski o oddziaływaniach nietermicznych [37]. Obecnie określenie SAR jest podstawowym wymogiem w przypadku poważnych badań naukowych w tej dziedzinie, dlatego większość projektów powinna angażować badaczy z różnych dziedzin.

6. Wnioski

Aktualnie dowody na przyczynowy związek pomiędzy RF EMF i zdrowiem ludzkim są mało przekonujące. Wiele prac biorących pod uwagę ten problem budzi wątpliwości co do prawdziwości wyciąganych z nich wniosków. Nie jest możliwe zdefiniowanie jakiejś konkretnej wartości gęstości mocy, czy SAR, które byłyby z całą pewnością bezpieczne, lub szkodliwe. Ze względu na fakt, że mamy tutaj do czynienia ze stosunkowo nowymi zjawiskami i technologiami, najlepszym rozwiązaniem wydaje się zachowanie ostrożności i prewencja. Jedynie rzetelna informacja, edukacja i dialog z różnymi grupami społecznymi może zniwelować pojawiające się niepewność, niepokój i strach [40]. Najlepszym sposobem na redukcję narażenia społeczeństwa na ekspozycję na RF EMF jest edukacja. Znakomicie widać to na przykładzie wyników prezentowanych przez Tomitsch i współpracowników [69]. Autorzy pokazali w swojej pracy, że proste wskazówki i rady w jaki sposób korzystać z urządzeń elektrycznych pozwoliły znacząco obniżyć ekspozycję na PEM w zakresie niskich częstotliwości. Taką samą strategię warto rozważyć w przypadku EMF z zakresu RF.

7. Literatura

- [1] Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburg WJGM, Bolte JFB, de Snoo GR. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Int.* Elsevier Ltd; 2013;51:116–40.
- [2] Gherardini L, Ciuti G, Tognarelli S, Cinti C. Searching for the perfect wave: The effect of radiofrequency electromagnetic fields on cells. *Int J Mol Sci.* 2014;15(4):5366–87.
- [3] Altunkaynak BZ, Altun G, Yahyazadeh A, Kaplan AA, Deniz OG, Türkmen AP, et al. Different methods for evaluating the effects of microwave radiation exposure on the nervous system. *J Chem Neuroanat.* 2015;75:62–9.
- [4] Vermeeren G, Markakis I, Goeminne F, Samaras T, Martens L, Joseph W. Spatial and temporal RF electromagnetic field exposure of children and adults in indoor micro environments in Belgium and Greece. *Prog Biophys Mol Biol.* Elsevier Ltd; 2013;113(2):254–63.
- [5] Martens AL, Bolte JFB, Beekhuizen J, Kromhout H, Smid T, Vermeulen RCH. Validity of at home model predictions as a proxy for personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Environ Res.* Elsevier; 2015;142:221–6.
- [6] Eghlidospour M, Mortazavi SMJ, Yousefi F, Mortazavi SAR. New Horizons in Enhancing the Proliferation and Differentiation of Neural Stem Cells Using Stimulatory Effects of the Short Time Exposure to Radiofrequency Radiation. *J Biomed Phys Eng.* 2015;5(3):95–104.
- [7] Mortazavi SAR, Tavakkoli-Golpayegani A, Haghani M, Mortazavi SMJ. Looking at the other side of the coin: the search for possible biopositive cognitive effects of the exposure to 900 MHz GSM mobile phone radiofrequency radiation. *J Environ Heal Sci Eng.* 2014;12:75.
- [8] Lin JC. Mechanisms of Electromagnetic Field Coupling into Biological Systems at ELF and RF Frequencies. In: Lin JC, editor. *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems, Vol 3.* New York: Kluwer; 2000. p. 1–38.
- [9] Barnes FS, Greenebaum B. *Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields.* Greenbaum B, editor. Boca Raton: CRC Press; 2007.
- [10] Peyman A, Rezazadeh AA, Gabriel C. Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies. *Phys Med Biol.* 2001;46:1617–29.
- [11] Myroshnychenko V, Brosseau C. Finite-element modeling method for the prediction of the complex effective permittivity of two-phase random statistically isotropic heterostructures. *J Appl Phys.* 2005;97(4).

- [12] Peyman A, Holden S, Gabriel C. Dielectric Properties of Tissues at Microwave Frequencies. MTHR Final Technical Report. 2005.
- [13] Balzano Q. Proposed test for detection of nonlinear responses in biological preparations exposed to RF energy. *Bioelectromagnetics*. 2002 May;23(4):278–87.
- [14] Lin JC, Gandhi OP. Computational Methods for Predicting Field Intensity. In: *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic fields*. CRC Press. Boca Raton; 1996. p. 337–402.
- [15] Harrington RF. *Field Computation by Moment Methods*. Wiley-IEEE Press; 1993.
- [16] Paulsen KD, Jia X, Sullivan JM. Finite element computations of specific absorption rates in anatomically conforming full-body models for hyperthermia treatment analysis. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1993 Sep;40(9):933–45.
- [17] Sullivan DM. A frequency-dependent FDTD method for biological applications. *IEEE Trans Microw Theory Tech*. 1992;40(3):532–9.
- [18] Li C, Chen Z, Yang L, Lv B, Liu J, Varsier N, et al. Generation of infant anatomical models for evaluating electromagnetic field exposures. *Bioelectromagnetics*. 2015 Jan;36(1):10–26.
- [19] Wilmore JH, Costill DL. *Physiology of Sport and Exercise*. Champaign IL: Human Kinetics Publishers; 2004.
- [20] Kuznetsov A V. Optimization problems for bioheat equation. *Int Commun Heat Mass Transf*. 2006;33(5):537–43.
- [21] Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Report of Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. 2015.
- [22] Levine RD. *Molecular Reaction Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
- [23] Bakthisaran R, Tangirala R, Rao CM. Small heat shock proteins: Role in cellular functions and pathology. *Biochim Biophys Acta*. Elsevier B.V.; 2015;1854(4):291–319.
- [24] Bozaykut P, Ozer NK, Karademir B. Regulation of protein turnover by heat shock proteins. *Free Radic Biol Med*. Elsevier; 2014;77:195–209.
- [25] Rosenbaum EJ. *Physical Chemistry*. New York: Appleton-Century-Crofts; 1970.
- [26] Hinrikus H, Lass J, Karai D, Pilt K, Bachmann M. Microwave effect on diffusion: a possible mechanism for non-thermal effect. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(4):327–33.

- [27] Lv B, Chen Z, Wu T, Shao Q, Yan D, Ma L, et al. The alteration of spontaneous low frequency oscillations caused by acute electromagnetic fields exposure. *Clin Neurophysiol.* 2014;125(2):277–86.
- [28] McDonnell MD, Abbott D. What is stochastic resonance? Definitions, misconceptions, debates, and its relevance to biology. *PLoS Comput Biol.* 2009;5(5):e1000348.
- [29] Dasdag S, Akdag MZ. The link between radiofrequencies emitted from wireless technologies and oxidative stress. *J Chem Neuroanat.* Elsevier B.V.; 2016;75:85–93.
- [30] Morgan LL, Kesari S, Davis DL. Why children absorb more microwave radiation than adults: The consequences. *J Microsc Ultrastruct.* Saudi Society of Microscopes; 2014;2(4):197–204.
- [31] Johansen C. Electromagnetic fields and health effects — epidemiologic studies of cancer, diseases of the central nervous system and arrhythmia-related heart disease by Christoffer Johansen, PhD. 2004;24(1):46–53.
- [32] Carlberg M, Hedendahl L, Ahonen M, Koppel T, Hardell L. Increasing incidence of thyroid cancer in the Nordic countries with main focus on Swedish data. *BMC Cancer.* BMC Cancer; 2016;16:426.
- [33] Pall ML. Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *J Chem Neuroanat.* Elsevier B.V.; 2015;75:43–51.
- [34] Schoeni A, Roser K, Rösli M. Memory performance, wireless communication and exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A prospective cohort study in adolescents. *Environ Int.* Elsevier Ltd; 2015;85:343–51.
- [35] Danker-Hopfe H, Dorn H, Bolz T, Peter A, Hansen ML, Eggert T, et al. Effects of mobile phone exposure (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on polysomnography based sleep quality: An intra- and inter-individual perspective. *Environ Res.* Elsevier; 2016;145:50–60.
- [36] Huss A, Van Eijsden M, Guxens M, Beekhuizen J, Van Strien R, Kromhout H, et al. Environmental radiofrequency electromagnetic fields exposure at home, mobile and cordless phone use, and sleep problems in 7-year-old children. *PLoS One.* 2015;10(10):1–14.
- [37] Verschaeve L, Juutilainen J, Lagroye I, Miyakoshi J, Saunders R, de Seze R, et al. In vitro and in vivo genotoxicity of radiofrequency fields. *Mutat Res - Rev Mutat Res.* 2010;705(3):252–68.
- [38] Baliatsas C, Bolte J, Yzermans J, Kelfkens G, Hooiveld M, Lebreton E, et al. Actual and perceived exposure to electromagnetic fields and non-specific physical symptoms: an

- epidemiological study based on self-reported data and electronic medical records. *Int J Hyg Environ Health*. 2015 May;218(3):331–44.
- [39] Guxens M, Vermeulen R, van Eijsden M, Beekhuizen J, Vrijkotte TGM, van Strien RT, et al. Outdoor and indoor sources of residential radiofrequency electromagnetic fields, personal cell phone and cordless phone use, and cognitive function in 5-6 years old children. *Environ Res*. Elsevier; 2016;150:364–74.
- [40] Meena JK, Verma A, Kohli C, Ingle GK. Mobile phone use and possible cancer risk: Current perspectives in India. *Indian J Occup Environ Med*. India: Medknow Publications & Media Pvt Ltd; 2016;20(1):5–9.
- [41] Cardis E. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: Results of the INTERPHONE international case-control study. *Int J Epidemiol*. Oxford University Press; 2010 Jun 1;39(3):675–94.
- [42] Cardis E, Armstrong BK, Bowman JD, Giles GG, Hours M, Krewski D, et al. Risk of brain tumours in relation to estimated RF dose from mobile phones: results from five Interphone countries. *Occup Environ Med*. 2011;68(9):631–40.
- [43] Morgan LL, Miller AB, Sasco A, Davis DL. Mobile phone radiation causes brain tumors and should be classified as a probable human carcinogen (2A) (Review). *Int J Oncol*. 2015;46(5):1865–71.
- [44] Hardell L, Carlberg M, Hansson Mild K. Use of mobile phones and cordless phones is associated with increased risk for glioma and acoustic neuroma. *Pathophysiology*. Elsevier Ireland Ltd; 2013;20(2):85–110.
- [45] Hardell L, Carlberg M. Mobile phone and cordless phone use and the risk for glioma - Analysis of pooled case-control studies in Sweden, 1997-2003 and 2007-2009. *Pathophysiology*. Elsevier Ireland Ltd; 2015;22(1):1–13.
- [46] Aydin D, Feychting M, Schüz J, Tynes T, Andersen TV, Schmidt LS, et al. Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: A multicenter case-control study. *J Natl Cancer Inst*. 2011 Aug 17;103(16):1264–76.
- [47] Coureau G, Bouvier G, Lebailly P, Fabbro-Peray P, Gruber A, Leffondre K, et al. Mobile phone use and brain tumours in the CERENAT case-control study. *Occup Environ Med*. 2014;514–22.
- [48] Chapman S, Azizi L, Luo Q, Sitas F. Has the incidence of brain cancer risen in Australia since the introduction of mobile phones 29 years ago? *Cancer Epidemiol*. Elsevier Ltd; 2016;42:199–205.

- [49] Schüz J, Elliott P, Auvinen A, Kromhout H, Poulsen AH, Johansen C, et al. An international prospective cohort study of mobile phone users and health (Cosmos): Design considerations and enrolment. *Cancer Epidemiol.* 2011;35(1):37–43.
- [50] Eltiti S, Wallace D, Russo R, Fox E. Aggregated data from two double-blind base station provocation studies comparing individuals with idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic fields and controls. *Bioelectromagnetics.* 2015;36(2):96–107.
- [51] Adams JA, Galloway TS, Mondal D, Esteves SC, Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int.* Elsevier B.V.; 2014;70:106–12.
- [52] Liu K, Li Y, Zhang G, Liu J, Cao J, Ao L, et al. Association between mobile phone use and semen quality: A systemic review and meta-analysis. *Andrology.* 2014;2(4):491–501.
- [53] Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Polarization: A Key Difference between Man-made and Natural Electromagnetic Fields, in regard to Biological Activity. *Sci Rep.* Nature Publishing Group; 2015;5(February):14914.
- [54] Pall ML. Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. *J Cell Mol Med.* 2013;17(8):958–65.
- [55] Pasquino N, Moriello RS Lo. A Critical Note to the Standard Procedure for Assessing Exposure to GSM Electromagnetic Field. *Measurement.* Elsevier Ltd; 2015;73(2015):563–75.
- [56] Freudenstein F, Correia LM, Oliveira C, Sebastião D, Wiedemann PM. Exposure knowledge and perception of wireless communication technologies. *Int J Environ Res Public Health.* 2015;12(11):14177–91.
- [57] Freudenstein F, Wiedemann PM, Brown TWC. Exposure Perception as a Key Indicator of Risk Perception and Acceptance of Sources of Radio Frequency Electromagnetic Fields. *J Environ Public Health.* Hindawi Publishing Corporation; 2015;2015.
- [58] MacGregor DG, Slovic P, Malmfors T. “How exposed is exposed enough?” Lay inferences about chemical exposure. *Risk Anal.* 1999 Aug;19(4):649–59.
- [59] Gonzalez-Rubio J, Najera A, Arribas E. Comprehensive personal RF-EMF exposure map and its potential use in epidemiological studies. *Environ Res.* Elsevier; 2016;149:105–12.
- [60] Beekhuizen J, Heuvelink GBM, Huss A, Bürgi A, Kromhout H, Vermeulen R. Impact of input data uncertainty on environmental exposure assessment models: A case study for electromagnetic field modelling from mobile phone base stations. *Environ Res.* Elsevier; 2014;135:148–55.

- [61] Aerts S, Deschrijver D, Verloock L, Dhaene T, Martens L, Joseph W. Assessment of outdoor radiofrequency electromagnetic field exposure through hotspot localization using kriging-based sequential sampling. *Environ Res. Elsevier*; 2013;126:184–91.
- [62] Juhász P, Bakos J, Nagy N, Jánossy G, Finta V, Thuróczy G. RF personal exposimetry on employees of elementary schools, kindergartens and day nurseries as a proxy for child exposures. *Prog Biophys Mol Biol. Elsevier Ltd*; 2011;107(3):449–55.
- [63] Aminzadeh R, Thielens A, Bamba A, Kone L, Gaillot DP, Lienard M, et al. On-body calibration and measurements using personal radiofrequency exposimeters in indoor diffuse and specular environments. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(5):298–309.
- [64] Straume A, Oftedal G, Johnsson A. Skin temperature increase caused by a mobile phone: a methodological infrared camera study. *Bioelectromagnetics*. 2005 Sep;26(6):510–9.
- [65] Gaestel M. Biological monitoring of non-thermal effects of mobile phone radiation: Recent approaches and challenges. *Biol Rev*. 2010;85(3):489–500.
- [66] Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Real versus Simulated Mobile Phone Exposures in Experimental Studies. *Biomed Res Int*. 2015;2015:607053.
- [67] Gangi S, Johansson O. A theoretical model based upon mast cells and histamine to explain the recently proclaimed sensitivity to electric and/or magnetic fields in humans. *Med Hypotheses*. 2000;54(4):663–71.
- [68] Calderon C, Addison D, Mee T, Findlay R, Maslanyj M, Conil E, et al. Assessment of extremely low frequency magnetic field exposure from GSM mobile phones. *Bioelectromagnetics*. 2014;35(3):210–21.
- [69] Tomitsch J, Dechant E. Exposure to electromagnetic fields in households-Trends from 2006 to 2012. *Bioelectromagnetics*. 2015;36(1):77–85.