

Elżbieta Sobiczewska

Stanisław Szmiągowski

Jaromir Sobiech

BADANIA DOŚWIADCZALNE — MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA W POZNANIU EFEKTÓW BIOLOGICZNYCH I RYZYKA ZDROWOTNEGO PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

EXPERIMENTAL STUDIES — POSSIBILITIES AND LIMITATIONS IN ASSESSING BIOEFFECTS AND HEALTH RISK OF
ELECTROMAGNETIC FIELDS

Zakład Ochrony Mikrofalowej Wojskowego

Instytut Higieny i Epidemiologii, Warszawa

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono problematykę badań doświadczalnych w aspekcie możliwości i ograniczeń w poznaniu efektów biologicznych i ryzyka zdrowotnego pól elektromagnetycznych (PEM). Badania efektów biologicznych i skutków powstawania tych efektów prowadzone są na różnych poziomach biologicznych. Badania doświadczalne prowadzone na strukturach komórkowych i zwierzętach prowadzą przede wszystkim do poznania mechanizmów oddziaływania PEM i obserwacji ewentualnych efektów biologicznych tych pól. W celu określenia ryzyka zdrowotnego ekspozycji na PEM niezbędne jest prowadzenie badań na ludziach (ochotnicy) bądź na populacji ludzkiej — badań epidemiologicznych. Wykorzystywany w doświadczeniach materiał biologiczny jest specyficznym miernikiem oddziaływania PEM na organizm i, jak każdy miernik, ma swoje zalety i wady, a jego wskazania mogą być obarczone błędem. Należy to zawsze uwzględnić przy analizie i interpretacji wyników badań doświadczalnych. Med. Pr. 2008;59(1):79–86

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, pomiary SAR, metodyka doświadczeń

ABSTRACT

An issue of experimental studies is reviewed in view of their possibilities and limitations in assessing bioeffects and health risk of electromagnetic fields (EMFs). Investigations of bioeffects and their consequences are being performed at different levels of biological organization. Experimental studies involving cellular structures and animals lead mostly to the assessment of mechanisms of EMFs interaction and to the observation of possible bioeffects. To assess health risk of exposure to EMFs it is necessary to perform studies involving human subjects (volunteers) or epidemiological studies targeted at specific human populations. The biological material applied in experiments appears to be a specific measure of the effect exerted by EMFs on the body, but as every measure, it has its own advantages and disadvantages and the obtained results may be burdened with some errors, which should be analyzed during the interpretation of experimental study results. Med Pr 2008;59(1):79–86

Key words: electromagnetic field, SAR measurements, methodology of experiments

Adres autorów: Kozielska 4, 01-163 Warszawa, e-mail: e.sobiczewska@wihe.waw.pl

Nadesłano: 2 stycznia 2008

Zatwierdzono: 4 lutego 2008

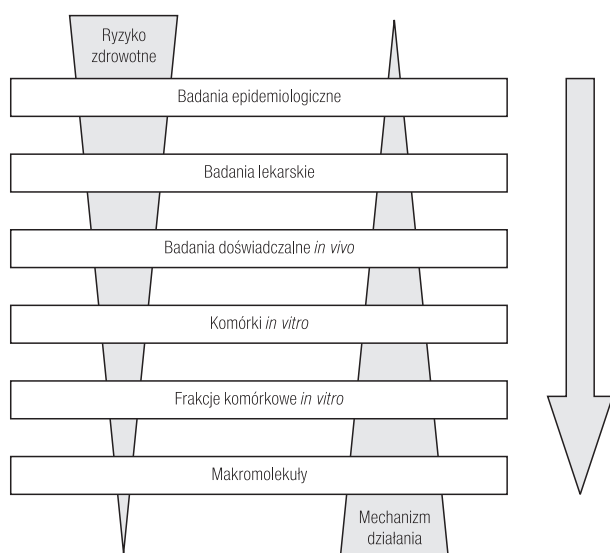
WSTĘP

Wpływ pola elektromagnetycznego (PEM) na środowisko, organizmy żywe, a przede wszystkim na zdrowie i życie człowieka od dawna budził zainteresowanie środowisk naukowych (biologów, fizyków i lekarzy). Niestety wieloletnie i wielokierunkowe badania do dzisiaj nie przyniosły jednoznacznych rozstrzygnięć co do szkodliwego wpływu PEM na ustroje żywe. Gwałtowny wzrost w ostatnich latach liczby źródeł PEM, w tym przede wszystkim rozwój telefonii komórkowej emitującej mikrofałę, spowodował intensywny rozwój

badań nad oddziaływaniem PEM na zdrowie i życie człowieka.

Badania efektów biologicznych PEM, mechanizmów i skutków ich powstawania prowadzone są na różnych poziomach biologicznych, zaczynając od poziomu molekularnego (atomy, cząsteczki), poprzez eksperymenty na komórkach, narządach, zwierzętach, a kończąc na badaniach człowieka i populacji ludzkiej (1–3) (ryc. 1). Doświadczenia prowadzone *in vitro* na strukturach komórkowych, żywych komórkach czy zawiesinach komórkowych pozwalają ocenić wpływ PEM, w dobrze kontrolowanych warunkach ekspozycji, na badane struktury. Określenie interakcji na poziomie molekularnym czy komórkowym jest ważne dla zrozumienia

* Praca wygłoszona podczas Warsztatów IMP 2007 — Ochrona przed PEM „Pomiary PEM dla celów bezpieczeństwa i ochrony człowieka w środowisku i miejscu pracy. Dobór aparatury pomiarowej. Szacowanie niepewności pomiaru”, Łódź 17–19 października 2007 r.



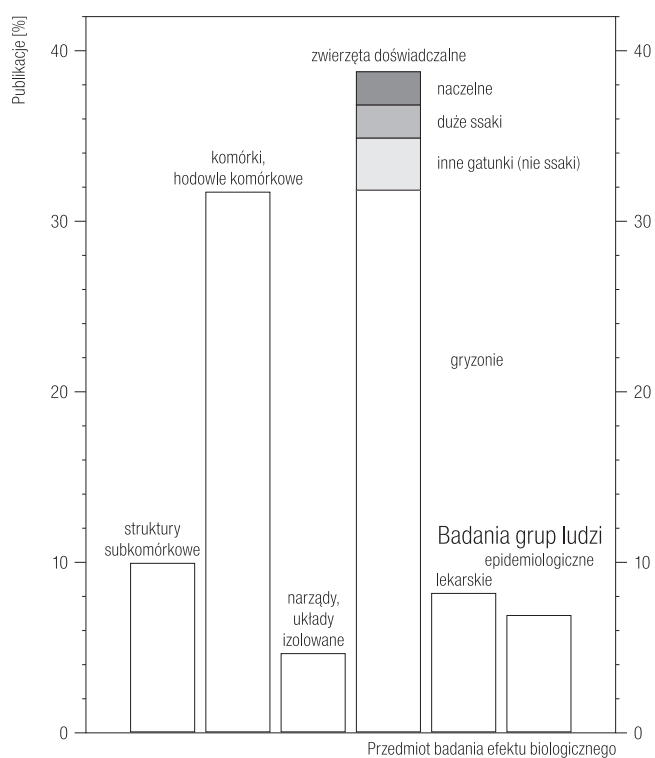
Ryc. 1. Możliwości badania mechanizmów działania, efektów biologicznych i ryzyka zdrowotnego pól elektromagnetycznych na różnych szczeblach organizacji biologicznej.

Fig. 1. The possibility of measuring mechanisms by which electromagnetic fields (EMFs) exert their biological effects and generate health risk.

mechanizmu działania PEM, jednakże wyniki uzyskane *in vitro* nie dają się bezpośrednio przełożyć na ocenę reakcji całego organizmu żywego na ekspozycję w PEM (4,5). Organizm ma wykształcone w toku ewolucji skomplikowane mechanizmy adaptacyjne, kompensacyjne i regeneracyjne, które w badaniach *in vivo* prowadzonych na całym organizmie mogą maskować lub nawet znosić efekty działania PEM uzyskiwane w doświadczeniach *in vitro*.

Ponieważ głównym celem badań efektów biologicznych PEM jest określenie wpływu tych pól na zdrowie człowieka, a możliwości wykorzystania ludzi w badaniach doświadczalnych są bardzo ograniczone, podstawowym obiektem eksperymentalnym stały się zwierzęta. Analiza publikowanych materiałów naukowych związanych z badaniem oddziaływania biologicznego PEM jednoznacznie wskazuje, że eksperymenty na zwierzętach doświadczalnych, w tym przede wszystkim na gryzoniach, stały się głównym źródłem informacji na temat wpływu PEM na organizmy żywe (3–5) (ryc. 2).

Zwierzęta, podobnie jak człowiek, mają silnie rozwinięte mechanizmy pozwalające rekompensować negatywny wpływ różnych czynników zewnętrznych (biologicznych, fizycznych i chemicznych) na organizm, a tym samym przystosować się do zmiennych warunków środowiska. Otrzymane wyniki nie powinny być jednak uogólniane i w bezpośredni sposób ekstrapolowane na człowieka. Aby wyniki badań na zwierzętach mogły być odnoszone do ludzi, planowane eksperymenty



Ryc. 2. Analiza publikacji na temat oddziaływania biologicznego pól elektromagnetycznych.

Fig. 2. A review of publications on biological effects of electromagnetic fields (EMFs).

muszą zapewniać przede wszystkim warunki ekspozycji w PEM zbliżone do tych, na które narażeni są ludzie. Poza tym należy uwzględnić charakterystyczną dla badanego gatunku zwierząt naturalną odporność zwierzęcia na zmienne warunki otoczenia i jego podatność na stres.

Badania doświadczalne prowadzone na strukturach komórkowych i zwierzętach prowadzą przede wszystkim do poznania mechanizmów oddziaływania PEM i obserwacji ewentualnych efektów biologicznych tych pól (4,5). W celu określenia ryzyka zdrowotnego ekspozycji na PEM niezbędne jest prowadzenie badań na ludziach (ochotnikach) bądź na populacji ludzkiej — badań epidemiologicznych (ryc. 1). Wykorzystywany w doświadczeniach materiał biologiczny jest specyficznym „miernikiem” oddziaływania PEM na organizm i jak każdy miernik ma swoje zalety i wady, a jego odczyt może być obciążony błędem. Należy to zawsze uwzględnić przy analizie i interpretacji wyników badań doświadczalnych.

Optimalizacja warunków ekspozycji na PEM w badaniach doświadczalnych

We wszystkich badaniach doświadczalnych obiektów biologicznych należy zapewnić jednorodne PEM, które

w całym obszarze nie powinno zmieniać się o więcej niż 10%.

W PEM o bardzo niskich i niskich częstotliwościach badania doświadczalne prowadzone są pod kątem oceny oddziaływania na obiekt biologiczny składowej elektrycznej (E) lub magnetycznej (H). Dla oceny oddziaływania składowej E buduje się strukturę podobną do kondensatora, do jego okładek przykłada się napięcie o określonej częstotliwości, a we wnętrzu umieszcza się badany obiekt (1,3). Takie „kondensatory” buduje się również dla potrzeb badania ludzi.

Do oceny oddziaływania składowej H stosuje się odpowiednio skonstruowane cewki indukcyjne o średnicy zależnej od wielkości obiektu badanego. W praktyce takie cewki mają średnicę 20–100 cm, a jeżeli obiekt jest wysoki, to nakłada się kilka warstw takich cewek.

Dla PEM radio- i mikrofalowych warunki pola jednorodnego zapewniają: linia paskowa (dla częstotliwości 0,1–100 MHz), falowód (100 MHz–300 GHz) lub komora bezechowa w całym zakresie radiofal i mikrofal. W każdym z tych układów doświadczalnych umieszcza się badane obiekty w jednorodnym polu o znanej gęstości strumienia energii (W/m^2). Ponieważ wprowadzony obiekt zawsze zaburza rozkład pola, a absorpcja energii PEM jest niejednorodna i w opromienianym obiekcie mogą wystąpić tzw. gorące punkty, sama znajomość gęstości strumienia energii we wnętrzu falowodu czy komory bezechowej okazuje się niewystarczająca do pełnej oceny warunków ekspozycji. W związku z tym konieczne jest obliczenie i/lub zmierzenie wielkości stopnia absorpcji energii (SAR) wyrażonej w W/kg. Istnieje kilka metod oceny SAR.

METODY OCENY SAR W OBIEKTACH BIOLOGICZNYCH

Dozymetria doświadczalna

Pomiary falowodowe

Metody falowodowe pozwalają na wyznaczenie SAR przez pomiar mocy pochłanianej przez obiekt umieszczony w falowodzie. Jeżeli m jest masą obiektu, zaś P_a mocą przez niego pochłanianą, SAR wyznacza się z zależności (6,7):

$$SAR = \frac{P_a}{m} \quad [1]$$

zaś:

$$P_a = P_{we} - P_{re} - P_{wy} \quad [2]$$

gdzie:

P_{we} — moc padająca na wejściu falowodu,

P_{re} — moc odbita na wejściu falowodu,

P_{wy} — moc mierzona na wyjściu falowodu.

Ze względu na konieczność pomiaru SAR małych próbek, takich jak hodowle komórkowe eksponowanych na PEM na poziomie wartości dopuszczalnych dla osób zawodowo narażonych na PEM oraz populacji ogólnej, wykorzystuje się modyfikację metody falowodowej. W tym przypadku wykonuje się dwa pomiary. Pierwszym krokiem jest pomiar mocy odbitej na wejściu falowodu oraz mocy na wyjściu pustego falowodu. Kolejnym — umieszczenie obiektu w falowodzie i powtórzenie pomiarów. Warunkiem wyznaczenia mocy absorbowanej jest stała wartość mocy padającej na wejście falowodu w obydwu krokach. Metoda zmodyfikowana wnosi poprawkę na straty mocy w układzie inne niż w straty w badanym obiekcie. Moc pochłanianą przez obiekt w falowodzie wyznacza się z zależności:

$$P_a = (P_{wy0} - P_{wy}) + (P_{re0} - P_{re}) \quad [3]$$

Indeksy z zerem odnoszą się do pomiaru mocy bez obiektu w falowodzie, zaś pozostałe do pomiaru z obiektem w falowodzie.

Do zalet metod falowodowych należy duża dokładność pomiaru oraz możliwość wykonywania pomiarów na żywych organizmach, jak np. małe ssaki, owady rośliny oraz hodowle tkankowe. Podstawowe wady to ograniczone rozmiary badanych obiektów oraz brak możliwości generacji dowolnego rozkładu PEM w otoczeniu obiektu.

Pomiary przyrostu temperatury

Pochłanianą przez obiekt energia PEM zamieniana jest w ciepło. Mierząc przyrost temperatury obiektu w czasie, można ocenić jego SAR zgodnie z zależnością:

$$SAR = c \frac{\partial T}{\partial t} \quad [4]$$

gdzie:

c — ciepło właściwe obiektu,

T — temperatura,

t — czas.

Ponieważ pomiar temperatury jest wykonywany podczas ekspozycji obiektu na PEM, pożądane jest by zaburzał je w możliwie małym stopniu. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wykorzystanie termometrów światłowodowych (8), które wykorzystują temperaturową zależność absorpcji światła w półprzewodniku.

Pomiar SAR metodą przyrostu temperatury obciążony jest błędami związanymi z procesami wymiany ciepła między obiektem a otoczeniem. Niestety pomiar SAR organizmu żywego tą metodą obciążony jest też błędem, którego przyczyną są mechanizmy termoregulacyjne,

takie jak zwiększenie skórno przepływu krwi, parowanie potu oraz parowanie przez płuca.

Podstawową zaletą tej metody jest możliwość pomiaru SAR ciała umieszczonego w PEM o dowolnym rozkładzie. Do najistotniejszych jej wad należy związana z procesami wymiany ciepła konieczność wykonywania pomiarów w polach o dużym natężeniu.

Metody kalorymetryczne

Procedura oceny SAR z wykorzystaniem kalorymetru polega na umieszczeniu w nim badanego obiektu bezpośrednio po ekspozycji na PEM. W kalorymetrze zachodzi wymiana ciepła między badanym ciałem a znajdującym się w kalorymetrze płynem. Proces trwa do czasu wyrównania temperatur. Jeżeli przed ekspozycją na PEM badane ciało oraz płyn kalorymetryczny znajdowały się w tej samej temperaturze i znane są ich masy oraz ciepło właściwe, można wyznaczyć różnicę ilości energii PEM traconej w ciele w czasie ekspozycji oraz oddawanej przez ciało w tym czasie do otoczenia w postaci ciepła.

Szacowanie ilości ciepła oddawanego przez ciało do otoczenia w czasie ekspozycji odbywa się poprzez porównanie ilości ciepła oddanego przez ciało płynowi kalorymetrycznemu, gdy ciało zostało umieszczone w kalorymetrze bezpośrednio po ekspozycji, oraz powtórzenie pomiaru w tych samych warunkach i umieszczenie ciała w kalorymetrze po upływie pewnego czasu od ekspozycji. W przypadku wyznaczania SAR z dwóch pomiarów przyjmuje się liniowy spadek temperatury ciała oddającego ciepło do otoczenia (9).

Podobnie jak w metodach pomiaru przyrostu temperatury, tu również można mierzyć SAR w polu o dowolnym rozkładzie. Niestety metody kalorymetryczne są trudne w realizacji, czasochłonne, a rozmiary mierzonych obiektów są ograniczone rozmiarami kalorymetru. Jednocześnie z oczywistych względów metoda ta wyklucza pomiary SAR organizmów żywych.

Metody termograficzne

Temperatura skóry jest wynikiem dynamicznej równowagi między ciepłem uwalnianym w przemianach metabolicznych oraz dostarczanym do skóry w procesie przewodnictwa cieplnego i konwekcji krwi a ciepłem oddawanym do otoczenia przez promieniowanie, konwekcję i parowanie. Ekspozycja w PEM może powodować wzrost temperatury tkanek, a tym samym i obserwowalne zmiany rozkładu ciepłoty skóry. Aparat termograficzny rejestruje wytwarzane przez organizm promieniowanie termiczne. Pozwala on na rejestrację

rozkładu temperatury na powierzchni ciała oraz obserwację zmian temperatury powodowaną różnymi czynnikami, w tym i PEM.

Niestety informacja o rozkładzie temperatury na powierzchni ciała nie wystarcza do wyznaczenia SAR obiektu. W przypadku fantomów oraz zwłok pomiar SAR polega na ekspozowaniu na PEM podzielonego uprzednio na warstwy badanego obiektu, a bezpośrednio po ekspozycji rozdzielaniu tych warstw i wykonaniu zdjęć termograficznych ich powierzchni (9). Wyznaczenie SAR na podstawie pomiarów temperatury na powierzchni ciała, bez uprzedniego jego podziału na warstwy jest możliwe w zakresie centymetrowym oraz krótszych fal, kiedy to większość energii PEM wytraca się w powierzchniowych warstwach ciała.

Metody termograficzne, z uwagi na ich rozdzielczość, wymagają ekspozycji na PEM o stosunkowo dużym natężeniu. Przeważnie są metodami inwazyjnymi i mają zastosowanie do fantomów lub zwłok. W przypadku szacowania SAR organizmów żywych w zakresie fal centymetrowych i krótszych na podstawie pomiarów rozkładu temperatury wynik może zostać zniekształcony zmianami rozkładu temperatury powierzchni ciała wynikającymi z innych, niż powodowanych PEM czynników, takich jak np. stres.

Fantomy

Fantom jest naturalnej wielkości modelem ciała ludzkiego, jego części lub narządu. Oczekuje się, że rozkład natężenia pola elektrycznego wewnątrz fantomu będzie przybliżeniem rozkładu w żywym organizmie. W przypadku idealnym swoją reprezentację w fantomie znajdą wszystkie tkanki i narządy, a parametry elektryczne użytych do modelowania materiałów będą odpowiadały przenikalności i przewodności ciała. Pomiar pola w takim fantomie wymaga zastosowania wielu nieruchomych sond pomiarowych. Ich liczba i rozmieszczenie wiąże się z budową fantomu, a w szczególności wiernością odtworzenia szczegółów budowy anatomicznej ciała. W najprostszym przypadku każdej sondzie można przyporządkować pewną otaczającą ją objętość. Jeżeli zajmująca tę objętość substancja jest elektrycznie jednorodna, SAR w takiej objętości można wyznaczyć z zależności:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad [5]$$

gdzie:

E — wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego mierzonego przez sondę,

σ — przewodność substancji w obszarze,

ρ — gęstość.

Algorytm wyznaczania SAR średniego zależy od rozmieszczenia sond w fantomie.

Alternatywnym rozwiązaniem jest fantom jednorodny. Substancję wypełniającą taki fantom cechują parametry elektryczne zbliżone do średniej przenikalności i przewodności organizmu. Niejednokrotnie jest on zbudowany z cienkiej powłoki oraz wypełniającego wnętrza płynu fantomowego. Powłoka fantomu powinna być wykonana z materiału o małej stratności oraz małej przenikalności. W fantomach jednorodnych wypełnionych cieczą wykorzystuje się jedną sondę, która przemieszczając się w cieczy, daje informację o natężeniu pola elektrycznego (10). Procedura wyznaczenia SAR bazuje na identycznych, jak poprzednio, założeniach. Każdemu punktowi pomiarowemu przyporządkowuje się otaczającą go objętość i dla niej oblicza się SAR lokalny. Algorytm wyznaczania SAR średniego zależy od sposobu przemieszczania się sondy w fantomie.

Pośród zalet metody należy wymienić dużą czułość oraz możliwość wykonywania pomiarów w polu o dowolnym rozkładzie. Pośród wad należy wskazać na trudności pomiaru pola na granicy fantomu oraz konieczność uproszczenia jego budowy w stosunku do organizmu żywego, co może prowadzić do odmiennych wyników.

Dozymetria teoretyczna

Teoretyczna ocena SAR w obiekcie biologicznym polega na obliczeniu rozkładu natężenia pola elektrycznego wewnątrz organizmu eksponowanego na PEM. Czyni się to, wykorzystując algorytmy numeryczne, takie jak metoda elementów skończonych czy FDTD. W algorytmach tych równania matematyczne opisujące PEM w organizmie rozwiązuje się w sposób dyskretny. Na przykład metoda FDTD polega na rozwiązaniu techniką marszu w czasie równań Maxwella zdyskretyzowanych w przestrzeni. Każdy obiekt zostaje zastąpiony jego dyskretnym modelem, a równania Maxwella są rozwiązywane metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu. SAR oblicza się, wykorzystując zależność 5. i czyniąc założenie zerowych strat magnetycznych w organizmie. O dokładności tych metod decydują wierność odtworzenia w przestrzeni obliczeniowej szczegółów budowy anatomicznej organizmu oraz dokładność określenia parametrów elektrycznych poszczególnych jego tkanek i narządów.

Badania doświadczalne *in vitro*

W badaniach doświadczalnych *in vitro* nad oddziaływaniem PEM na organizm wykorzystuje się jako materiał biologiczny czyste, izolowane układy doświadczalne,

począwszy od molekuł (np. cząsteczki enzymów, kwasów nukleinowych), poprzez płyny biologiczne, izolowane błony biologiczne, frakcje subkomórkowe, komórki, tkanki, a skończywszy na narządach. Badania doświadczalne *in vitro* stwarzają dobre warunki do badania mechanizmów interakcji PEM z materiałem biologicznym (4,5).

Zdecydowanie lepszym układem doświadczalnym, zbliżającym do poznania efektu biologicznego oddziaływania PEM na organizm, są żywe komórki izolowane z organizmu i utrzymywane w hodowli. Mają one zachowany metabolizm, zdolność wzrostu, dojrzewania oraz mogą reagować na różne czynniki zewnętrzne (np. PEM). Wadą takiego układu doświadczalnego jest jednak to, że komórki w hodowli wyłączone są spod naturalnych mechanizmów kontrolno-regulacyjnych organizmu i zachowują się, jak samodzielne „organizmy”, chociaż w warunkach naturalnych są tylko częścią złożonego organizmu.

Istotnym problemem w analizie przydatności badań komórkowych jest zależność dozymetryczna warunków ekspozycji na PEM między hodowlą komórkową a całym organizmem. W układach komórkowych dość dobrze można kontrolować warunki ekspozycji na PEM, dlatego też wyniki takich badań dostarczają cennych informacji dotyczących zarówno mechanizmu działania PEM, jak i charakteru obserwowanych zmian. Aby jednak takie wyniki można było wykorzystać w celu opisanie efektu biologicznego oddziaływania PEM na organizm, muszą one zostać potwierdzone na wyższych szczeblach organizacji biologicznej. Z tego powodu niezbędnym etapem w poznaniu efektów biologicznych i przybliżającym do oceny ryzyka zdrowotnego oddziaływania PEM na organizm jest prowadzenie badań doświadczalnych na zwierzętach (5).

Badania doświadczalne na zwierzętach

Idealnym gatunkiem zwierzęcia laboratoryjnego byłby taki, którego odpowiedź biologiczna na testowany czynnik byłaby identyczna z obserwowaną u ludzi. Niestety, przynajmniej na razie, nie jest to realne.

Zwierzętami najczęściej stosowanymi w eksperymentach naukowych są gryzonie, a wśród nich myszy, szczury i chomiki syryjskie. Szerokie wykorzystanie tych gatunków nie opiera się na ich biochemicznych, fizjologicznych czy anatomicznych podobieństwach do człowieka, ale raczej na uwarunkowaniach praktycznych, takich jak relatywnie krótki okres życia, mała wielkość i rynkowa dostępność. Innym ważnym względem jest posiadanie znacznej wiedzy dotyczącej tych

zwierząt, a obejmującej ich fizjologię, anatomię, genetykę, hodowlę, występowanie chorób spontanicznych, w tym częstotliwość pojawiania się nowotworów (11). Wybór gatunku zwierzęcia laboratoryjnego, a także jego szczepu, może mieć decydujące znaczenie dla przebiegu eksperymentu i uzyskanych wyników.

Każdy nowo powstający i rozwijający się organizm jest niejako sumą rekombinacji materiału genetycznego swych rodziców i oddziaływania środowiska, w którym żyje. Zespół posiadanych przez dany organizm genów (zapis genetyczny) jest dziedziczną, zakodowaną informacją zawartą w jądrze każdej jego komórki i nosi nazwę 'genotyp'. Wypadkową tego szyfru biologicznego i warunków środowiskowych, w jakich dany organizm wzrasta (warunki otoczenia, zanieczyszczenie środowiska, stosowana dieta, leki itp.) są właściwości morfologiczne, fizjologiczne, biochemiczne czy nawet psychologiczne. Ten zespół cech danego osobnika nazywamy jego fenotypem (ryc. 3).

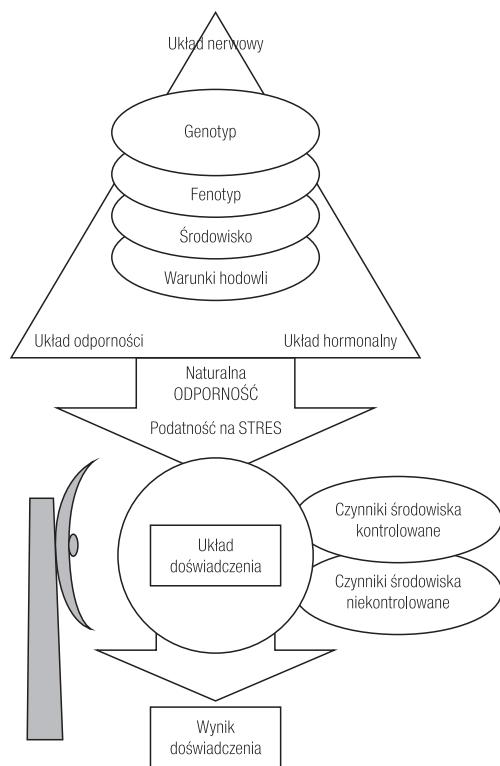
W przypadku zwierząt mamy coraz większy wpływ na to, jakim genotypem dysponować będzie wykorzystywany w badaniach doświadczalnych osobnik. Możemy zdać się na przypadek i używać zwierząt genetycznie niezdefiniowanych, ale możemy również korzystać

z tzw. szczepów wsobnych, tzn. takich, w których kolejne mioty zwierząt są wynikiem kojarzenia brata z siostrą. Po 20 tak uzyskiwanych pokoleniach będziemy mieli do czynienia z czystym 'szczepem wsobnym', którego przedstawiciele osiągną identyczny genotyp. Innym pochodnym wariantem jest tworzenie hybryd, czyli pierwszego pokolenia potomnego pochodzącego ze skrzyżowania przedstawicieli dwóch szczepów wsobnych.

Istotnym czynnikiem mogącym rzutować na przebieg i wyniki badań z użyciem zwierząt są warunki hodowli tych zwierząt, zarówno stada macierzystego, jak i później grup doświadczalnych (ryc. 3). Do warunków, które powinny być zachowane w trakcie całego eksperymentu należą: czystość (sterylizacja klatek i poideł), ustanowienie stałego cyklu oświetlenia i ciemności, dobra wentylacja, stała temperatura, ograniczenie zewnętrznego hałasu, stały dostęp do odpowiedniej paszy i wody oraz delikatność osób obsługujących. Przestrzeganie określonych zasad w prowadzeniu zwierzętarni i opieki nad zwierzętami w trakcie doświadczenia pozwoli maksymalnie ograniczyć podstawowy czynnik, który może rzutować na wyniki badań i ich interpretację — stres (11) (ryc. 3).

Ważne jest także, aby zwierzęta przez cały czas trwania eksperymentu przebywały w tych samych warunkach, tzw. warunkach kontrolowanych, a jedyną zmienną był czynnik, którego wpływ badamy — w naszym przypadku PEM. Zmiany w środowisku zewnętrznym zakłócają równowagę między środowiskiem zewnętrznym a wewnętrznym organizmu, czyli równowagę homeostatyczną. Ponowne jej osiągnięcie wymaga współdziałania większości układów w organizmie (układu nerwowego, hormonalnego, immunologicznego, krążenia) (11,12). Zapewnienie równowagi homeostatycznej w czasie trwania całego eksperymentu pozwoli na powiązanie obserwowanego efektu biologicznego tylko z oddziaływaniem badanego czynnika — PEM. Podział stada na grupy doświadczalne musi przebiegać losowo. W przypadku badania biologicznych efektów ekspozycji na PEM nieodzowne jest wyodrębnienie grup 'pozornie eksponowanych', tzn. podlegających manipulacjom identycznym jak zwierzęta poddawane działaniu pól, z wyłączeniem jedynie czynnika podstawowego, jakim jest ekspozycja. Drugą grupę kontrolną powinny stanowić zwierzęta, które nie opuszczają zwierzętarni.

Zwierzęta doświadczalne, będąc dobrym modelem poznawczym w badaniu efektów biologicznych działania PEM, nie są już tak dobrym modelem, gdy na podstawie wyników badań na zwierzętach chcemy ocenić ryzyko



Ryc. 3. Czynniki wpływające na wynik badań prowadzonych na zwierzętach doświadczalnych.

Fig. 3. Factors influencing the results of animal experimental studies.

zdrowotne PEM u ludzi. Przede wszystkim różnice fizjologiczne występujące między organizmem zwierzęcia a człowieka nie pozwalają na prostą ekstrapolację wyników. Organizmy małych zwierząt, a takie właśnie zwierzęta są głównym obiektem badań, inaczej niż człowiek absorbują energię PEM.. Ponieważ absorpcja energii na powierzchni czy we wnętrzu ciała zależy od wielkości, kształtu i ułożenia obiektu w polu elektrycznym, żaden model zwierzęcy nie odzwierciedla w pełni warunków ekspozycji człowieka (3–5). Różnice w wielkości i miejscu występowania prądów indukowanych na powierzchni i we wnętrzu ciała mogą powodować różne wartości progowe efektów biologicznych PEM dla zwierzęcia i człowieka oraz różny typ odpowiedzi czy reakcji obu organizmów na ekspozycję. Ogranicza to możliwość odniesienia występujących u zwierząt efektów biologicznych PEM do ryzyka zdrowotnego PEM u ludzi.

W warunkach laboratoryjnych, chociaż zapewniają one bardzo dobrze kontrolowaną ekspozycję, trudno jest odtworzyć rzeczywiste warunki ekspozycji, na którą narażony jest człowiek na stanowisku pracy i w środowisku. Nie do odtworzenia są różne uwarunkowania zewnętrzne zawsze towarzyszące człowiekowi narażonemu na ekspozycję w polach PEM i mogące mieć wpływ na skutki tej ekspozycji, np. pogoda, ubiór, stan psychiczny czy stan zdrowia. W związku z tym ekstrapolacja obserwowanych w doświadczeniach na zwierzętach efektów biologicznych na ryzyko zdrowotne dla ludzi jest bardzo trudna. Dodatkowo, dany model zwierzęcy może okazać się szczególnie wrażliwy na działanie PEM i możemy obserwować efekty, które nie wystąpią u ludzi. Do człowieka można ewentualnie odnosić tylko takie efekty biologiczne, które powtarzalnie występowałyby u różnych gatunków zwierząt, w tym u dużych ssaków i naczelnych. Ponadto, dość często w publikowanych badaniach doświadczalnych nad oddziaływaniem PEM na zwierzęta są one poddawane ekspozycji ciągłej przez okres od kilku godzin do kilkudziesięciu dni w PEM o wartościach znacznie wyższych od spotykanych w środowisku czy podczas ekspozycji zawodowej. Obserwowane zaś efekty biologiczne ekstrapoluje się bezpośrednio na rzeczywiste dla ludzi warunki ekspozycji w PEM.

Kolejnym ograniczeniem i wadą badań doświadczalnych ze zwierzętami eksponowanymi w PEM jest łatwość popełnienia błędów związanych z doбором zwierząt, warunkami hodowli, odpowiednią kontrolą stresu i prawidłowym przygotowaniem ekspozycji pozorowanej. Popełnienie takich błędów może być przyczyną często spotykanego braku powtarzalności otrzymanych

wyników, zarówno w obrębie jednego laboratorium, jak i między różnymi laboratoriami.

Na dzisiaj jednak, niezależnie od wad i ograniczeń, zwierzęta doświadczalne są jedynym, względnie dobrym modelem badania wpływu PEM na złożony układ biologiczny. Należy tylko pamiętać, że obserwowane u zwierząt skutki działania PEM nie dają się bezpośrednio przełożyć na efekty biologiczne i ryzyko zdrowotne u ludzi.

Badania doświadczalne a ocena ryzyka zdrowotnego

Badania doświadczalne prowadzone zarówno *in vitro*, jak i na zwierzętach są niezbędnym etapem w procesie poznania efektów biologicznych oddziaływania PEM na organizm człowieka (3,13). Do oceny ryzyka zdrowotnego PEM podstawowym źródłem informacji są jednak obserwacje ludzi narażonych na te pola.

Współcześnie prowadzi się coraz więcej badań nad efektami biologicznymi powodowanymi przez kontrolowaną ekspozycję ochotników w PEM. Mankamentem tych badań jest to, że ochotnicy mogą być eksponowani tylko na stosunkowo słabe PEM (nie może być przekroczona dopuszczalna norma dla ludności i środowiska). Ponadto, czas ekspozycji ochotników jest stosunkowo krótki (kilka–kilkanaście godzin). W tych warunkach, jeżeli w ogóle wystąpią jakieś uchwytne zmiany parametrów psychofizjologicznych, to mogą być one wynikiem działania mechanizmów adaptacyjnych i nie pozwolą wnioskować o ryzyku zdrowotnym.

Danych do oceny ryzyka zdrowotnego mogą dostarczać badania lekarskie grup pracowników zatrudnionych przy obsłudze i/lub naprawie urządzeń generujących PEM. U takich osób wykonywane są badania lekarskie i testy czynnościowe. Wyniki takich badań mogą zostać wykorzystane do oceny ryzyka zdrowotnego, jednak pod warunkiem porównania ich z wynikami osób stanowiących wiarygodną grupę kontrolną — obie grupy muszą różnić się tylko narażeniem PEM i brakiem tego narażenia (14). Stosunkowo największą wartość poznawczą mają w tej sytuacji badania lekarskie, w których nie ma grup kontrolnych, a porównaniu poddaje się grupy pracowników tego samego zakładu lub zbliżonych zakładów, o wyraźnie różnych poziomach narażenia na PEM. Poszukuje się zaś zależności efektów zdrowotnych od stopnia narażenia i czasu pracy, przy odpowiedniej standaryzacji wszystkich innych czynników. W bezpośredniej ekstrapolacji wyników takich badań na ocenę ryzyka zdrowotnego oddziaływania PEM przeszkadza to, że obserwacje dotyczą stosunkowo niedużych grup osób (14,15).

Do oceny ryzyka zdrowotnego niezbędne jest potwierdzenie wyników obserwacji, dotyczących niezbyt licznych grup, w badaniach epidemiologicznych populacji narażonych na PEM w pracy zawodowej lub w środowisku, oraz analiza epidemiologiczna związków przyczynowych wystąpienia określonego efektu zdrowotnego czy jednostki chorobowej w grupach osób mieszkających lub zatrudnionych w podobnych warunkach oddziaływania PEM. Każda grupa osób stanowi materiał niejednorodny — składa się z osobników o np. bardzo zróżnicowanym stanie zdrowia czy zdolnościach adaptacyjno-kompensacyjnych. Osoby takie funkcjonują w środowisku trudnym do standaryzacji — warunki socjalno-bytowe, stres, nawyki żywieniowe, używki, szkodliwe czynniki chemiczne i fizyczne. Dopiero na ten kompleks czynników nakłada się czynnik o stosunkowo niskiej aktywności biologicznej, jakim jest PEM o intensywnościach występujących w miejscu pracy czy środowisku. Z tego powodu tak trudno, mimo wielu podejmowanych prób, ustalić związki przyczynowe obserwowanych efektów z działaniem PEM, a publikowane wyniki badań (nawet te, które same nie budzą zastrzeżeń) w ocenie związku przyczynowego efektów zdrowotnych z działaniem PEM nie wykraczają poza poziom „prawdopodobny–przypuszczalny”.

PIŚMIENNICTWO

1. Klauenberg J.B., Miklavčič D. [red.]: Radiofrequency radiation dosimetry and its relationship to the biological effects of electromagnetic fields. NATO Science Series 3, High Technology, 32. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, Boston, London 2000; ss. 1–564
2. Matthes R., McKinlay A.F., Bernhardt J.H., Vecchia P., Veyret B.: Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100 kHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation, Monachium 2003
3. Takebe H., Shiga T., Kato M., Masada E. [red.]: Biological and health effects from exposure to power-line frequency electromagnetic fields. Ohmsha Ltd., Tokio 2001, ss. 1–368
4. Zmysłony M.: Biofizyczne mechanizmy działania (PEM) 0–300 GHz. W: Pola elektromagnetyczne w środowisku komunalnym i w środowisku pracy — źródła i oddziaływanie na człowieka. XX Szkoła Jesienna PTBR. Materiały konferencyjne. ZG PTBR, Warszawa 2004, ss. 47–60
5. Szmigielski S.: Współczesna ocena skutków biologicznego oddziaływania pól elektromagnetycznych (PEM) w świetle wyników badań doświadczalnych *in vitro* i *in vivo*. W: Pola elektromagnetyczne w środowisku komunalnym i w środowisku pracy — źródła i oddziaływanie na człowieka. XX Szkoła Jesienna PTBR. Materiały konferencyjne. ZG PTBR, Warszawa 2004, ss. 61–77
6. Kubacki R., Sobiech J.: The investigation of specific absorption rate of microwaves in the range of mobile and radar devices by young and mature mice. Proceedings of XVI International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON 2006, Kraków 2006, ss. 451–454
7. Kubacki R., Sobiech J., Wardak K.: Pomiary współczynnika SAR w obiektach biologicznych. Kompatybilność elektromagnetyczna w biologii i medycynie. Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa 2003, ss. 7–13
8. Alexandre I.: Fiber-Optic Temperature Measurement. Sensors Magazine Online [serial online] May 2001:[4 ss. ekranowe]. Adres: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0501/57/index.htm>
9. Durney C. H., Massoudi H., Iskander M. F.: Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook (Fourth Edition). Brooks Air Force Base, Texas 2002
10. Polska Norma PN-EN 50 361. Pomiary swobodnego tempa pochłaniania energii związanego z ekspozycją ludzi na pola elektromagnetyczne o częstotliwościach od 300 MHz do 3 GHz wytwarzane przez telefony ruchome: Norma podstawowa, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2003
11. Brylińska J., Kwiatkowska J. [red.]: Zwierzęta laboratoryjne. Metody hodowli i doświadczeń. Universitas, Kraków 1996
12. Beszczyńska B.: Zależność hormonalnej i behawioralnej reakcji na stres od stanu metabolicznego organizmu. Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń 2006
13. EC/SCENIHR: Possible effects of electromagnetic fields (EMF) on human health. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk, Bruksela 2007
14. Szmigielski S., Sobiczewska E.: Współczesne poglądy na ryzyko nowotworowe pól elektromagnetycznych 50 Hz w świetle wyników międzynarodowych programów badawczych. W: Szuba M., Tyszecki A. [red.]: Pola elektromagnetyczne 50 Hz w środowisku człowieka. EKO-KONSULT, Gdańsk 2003, ss. 31–47
15. Sobiczewska E., Szmigielski S.: Oddziaływanie biologiczne i ryzyko zdrowotne pól radiowych i mikrofalowych. Roczn. Wojsk. Inst. Hig. Epidemiol. 2000;35, Supl. 2:122–135