

Małgorzata Rochalska

**WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ORGANIZMY ŻYWE:
ROŚLINY, PTAKI I ZWIERZĘTA***

THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON LIVING ORGANISMS: PLANTS, BIRDS AND ANIMALS

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

STRESZCZENIE

Pola elektromagnetyczne, stałe i przemiennie stanowią stały element środowiska. Powstają z przyczyn naturalnych oraz z powodu działalności człowieka. W zależności od rodzaju pola, jego natężenia i czasu działania mają różny wpływ na świat żywej przyrody (roślin i zwierząt). Ich wpływ na świat roślin i zwierząt jest znacząco odmienny. Niektóre zwierzęta wykorzystują znajomość pola magnetycznego Ziemi do własnych celów. Med. Pr., 2007;58(1):37–48

Słowa kluczowe: pola elektromagnetyczne, pola magnetyczne, pola elektryczne, rośliny, zwierzęta, ptaki

ABSTRACT

Electromagnetic fields, constant and alternating, are a static element of the environment. They originate from both natural and man-made sources. Depending on the type of the field, its intensity and time of activity, they exert different effects on the natural world (plants and animals). Some animals utilize magnetic field of the earth for their own purposes. Med Pr 2007;58(1):37–48

Key words: electromagnetic fields, electric fields, magnetic fields, plants animals, birds

Adres autorki: Nowoursynowska 159, 02-686 Warszawa, e-mail: malogrzata_rochalska@sggw.pl

Nadesłano: 30.11.2006

Zatwierdzono: 28.12.2006

Pola elektromagnetyczne (PEM) a właściwie pola elektryczne i magnetyczne, powstają w sposób naturalny, wskutek budowy Ziemi, jej atmosfery oraz zjawisk kosmicznych. Są także, w coraz większym stopniu, skutkiem działalności człowieka, a ściślej mówiąc stosowania urządzeń technicznych.

NATURALNE POLA ELEKTROMAGNETYCZNE

Stale pole elektryczne Ziemi jest wynikiem różnicy potencjałów pomiędzy jonosferą a powierzchnią naszej planety. Przy dobrej pogodzie ma ono wartość 100 – 150 V/m. Natomiast, podczas silnych burz osiąga, w wyładowaniach, nawet 20 kV/m. Źródłem zmiennych pól elektrycznych są obiekty kosmiczne, głównie słońce (1).

Przyczyną występowania naturalnego pola magnetycznego Ziemi nie została dotychczas w pełni wyjaśniona. Wynika ono z budowy wnętrza planety. Wartość indukcji magnetycznej pola zależy od szerokości geograficznej i wynosi od 0 μ T (na biegunie magnetycznym) do 67 μ T na równiku magnetycznym. W Polsce jego wielkość to około 48 μ T. Pole magnetyczne Ziemi ulega

silnym zakłóceniom, powodowanym przez „wiatr słoneczny”, czyli strumień cząstek o wysokiej energii, emitowanych przez słońce, docierający do górnych warstw atmosfery i powodujący zaburzenia zwane burzami magnetycznymi. Są one czasami tak gwałtowne, że zagrażają właściwemu funkcjonowaniu urządzeń technicznych, np. elektrycznych sieci przesyłowych. Oddziaływanie słońca na górne warstwy atmosfery ziemskiej jest głównym źródłem naturalnych, zmiennych pól magnetycznych. Mają one częstotliwość od 500 MHz do 10 GHz. Ich natężenie zależy od stanu słońca i wynosi 0,03 μ T w okresie spokojnego słońca do 0,5 μ T podczas silnych burz magnetycznych (2).

**SZTUCZNE POLA ELEKTROMAGNETYCZNE
W ŚRODOWISKU**

Sztuczne pola elektromagnetyczne zostały wprowadzone do środowiska naturalnego przez człowieka. Emitują je różnorodne urządzenia techniczne stosowane w energetyce, przemyśle, łączności, radionawigacji, radiolokacji, medycynie, nauce, a nawet w gospodarstwie domowym. Każde urządzenie zasilane energią elektryczną jest ich źródłem. Energetyczne linie przesyłowe wytwarzające pole elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz mają w Polsce długość ponad 12,5 tys. kilome-

* Praca wygłoszona podczas Warsztatów IMP 2006 – Ochrona przed PEM „Raporty o oddziaływaniu na środowisko planowanych instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne oraz sprawozdania z badań i pomiarów – podstawy i praktyka”, Łódź, 17–19 października 2006 r.

trów. Linie przesyłowe wysokiego napięcia (440 kV) emitują pole o indukcji wynoszącej średnio 35 $\mu\text{T}/\text{kA}$. Linie przesyłowe są najpowszechniejszym, ale nie jedynym źródłem sztucznych pól elektromagnetycznych w środowisku. Istnieje coraz szersza sieć nadajników radiowo-telewizyjnych, a przede wszystkim różnych typów przekaźników telefonii komórkowej. Liczba źródeł sztucznych pól elektromagnetycznych rośnie z każdym rokiem i podwaja się co około 10 lat. Powoduje to powstanie smogu elektromagnetycznego, czyli wysokich wartości pól elektromagnetycznych różnych częstotliwości na pewnych, ograniczonych, obszarach, np. w centrach przemysłowych czy centralnych dzielnicach wielkich metropolii miejskich. Nawet coraz szerzej stosowane systemy bezpieczeństwa (np. bramki w supermarketach) narażają użytkowników na działanie pola o indukcji 0,1–1 mT (3).

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ROŚLINY

Pola elektromagnetyczne, a szczególnie pola magnetyczne niskiej częstotliwości, mają korzystny wpływ na rośliny. Tylko nieliczne prace wykazują ich szkodliwy wpływ, szczególnie na liczbę wytwarzanych gamet (4). Brak natomiast przekonujących dowodów na mutagenne czy teratogenne działanie tych pól.

Obserwowane, korzystne działanie naturalnego pola elektrycznego może być wynikiem bezpośredniej stymulacji tkanek roślinnych lub zwiększenia zawartości w glebie korzystnych dla roślin substancji chemicznych. Obserwowany wiosną gwałtowny rozwój roślinności stymulowany jest zarówno wzrostem natężenia naturalnego pola elektrycznego, którego wartość jest najwyższa wiosną – 122 V/m, a latem spada do 75 V/m, jak i wzbogaceniem gleby w związki azotu, powstające podczas burz w atmosferze i wymywane przez deszcz do gleby (5). Pole elektryczne wpływa na transport obdarzonych ładunkiem elektrycznym cząstek związków organicznych, w tym roślinnych hormonów wzrostu – auksyn. Również pole magnetyczne wpływa na transport substancji chemicznych w roślinach, np. poprzez zmianę otwarcia kanałów jonowych.

Wpływ pola elektrycznego

Nasiona traktowane stałym i zmiennym polem elektrycznym kiełkują lepiej i szybciej wydając silniejsze siewki, z których wyrastają lepiej plonujące rośliny. Wskazują na to dane zawarte w tabeli 1 i 2 (6).

Tabela 1. Wpływ pola elektrostatycznego na wschody i plonowanie pszenicy jarej (6)

Grupa	Natężenie pola kV/cm	Czas ekspozycji s	LZK %	Polowa zdolność wschodów %	Plon (% kontroli)
Kontrolna	0	0	85,5	94,5	100
Badana	1,25	3	97,8	98,3	114,8
	2,5	3	94,3	96,5	111,9
	3,75	3	91,5	95,8	106,8

LZK – laboratoryjna zdolność kiełkowania.

Tabela 2. Wpływ przemiennego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz, natężeniu 8kV/m i czasie działania 30 s na plonowanie zbóż (6)

Zboża	Plon q/ha	Przyrost plonu q/ha	Przyrost plonu %
Pszenica grupa kontrolna grupa badana	27,9 29,7	1,6	5,8
Owies grupa kontrolna grupa badana	21,1 21,9	0,7	3,2
Jęczmień grupa kontrolna grupa badana	23,7 24,2	0,5	2,1
Kukurydza grupa kontrolna grupa badana	37,8 39,9	2,1	5,4

Badania wpływu przemiennego pola elektrycznego o częstotliwości sieciowej (50 lub 60 Hz) i czasie działania od kilku sekund do 30 minut, prowadzone dla wielu gatunków roślin rolniczych i warzywnych, stwierdzały zwiększenie laboratoryjnej zdolności kiełkowania (LZK) nasion o 2–67%, wschodów polowych o 10–22%, a plonu o 4–30%. Najczęściej stosowano pola o niewielkim natężeniu (1–6 kV/cm). Ale nawet znacznie silniejsze pola (500–700 kV/cm) dawały korzystny efekt przy krótkim czasie działania (7). Najlepsze efekty daje stymulacja nasion polem o natężeniu 1 kV/cm przez około 10 sekund. Korzystny wpływ działania pola utrzymuje się przez kilka pokoleń roślin. Rośliny rosące w polu elektrycznym mają lepiej rozwinięty system korzeniowy, większą powierzchnię liści i więcej suchej masy. Pozwala to na lepsze pobieranie z gleby wody i substancji odżywczych oraz zwiększenie wydajności fotosyntezy, co skutkuje wyższym plonem.

Najlepiej widoczny jest korzystny efekt działania pól elektrycznych (np. pól elektroenergetycznych linii przesyłowych) na rosące w nim rośliny przy niekorzystnych warunkach środowiska (np. susza) lub glebowych (niekorzystny skład gleby lub nawożenie) (8).

Korzystne efekty działania pola elektrycznego spowodowane są uaktywnieniem fizjologicznych i biochemicznych procesów zachodzących w roślinach, takich jak np. metabolizm i transport jonów K^+ i Ca^{2+} , czy zmiany stężenia hormonów wzrostu (auksyn) w komórce. Są to zmiany niewielkie – 10^{-11} – 10^{-10} mola. Jednak w przypadku hormonów wystarczające, aby zmienić tempo wzrostu rośliny lub poszczególnych jej części.

Poddawanie nasion i roślin długotrwałemu działaniu silnego pola elektrycznego niskiej częstotliwości obniża ich wigor, a wyrosłe z nich rośliny są słabsze i gorzej plonują.

Wpływ stałego pola magnetycznego

Rośliny wykazują magnetotropizm. Najlepiej rozwijają się rośliny wyrosłe z nasion wysianych w taki sposób, aby ich zarodki skierowane były ku północnemu biegunowi magnetycznemu Ziemi. Przy innym ułożeniu zarodka rośliny rozwijają się znacznie wolniej. Uważa się, że przyczyną tego są różnice w przemieszczeniu się stymulatorów wzrostu (9).

Najkorzystniej działa stałe pole magnetyczne o niewielkim natężeniu. Silne pola (ponad 10T) skutkują jedynie nieznaczną stymulacją kiełkowania nasion. Ale nawet tak silne pola nie powodują niekorzystnych zmian w roślinach, pomimo że, teoretycznie, mogłyby powodować daleko idące zmiany w strukturze komórek, np. zmiany symetrii osiowej cząsteczek białka lub zwiększenie ruchliwości łańcuchów węglowodorowych lipidów błon komórkowych. Ten drugi efekt jest szczególnie ważny, bowiem błony są pierwotnym miejscem działania pola magnetycznego.

Wpływ stałego pola magnetycznego badano w stosunku do wielu gatunków roślin rolniczych, warzywnych, a nawet drzew i krzewów owocowych stosując różne natężenia pola i czasy jego działania. Rośliny rosnące przez cały okres wegetacji (od nasienia do nasienia) w stałym polu magnetycznym o indukcji 240–660 mT wykazywały szybsze kiełkowanie nasion i wzrost siewek, bujniejszy wzrost, przyspieszenie wegetacji i dawały wyższy plon wynikający z większej liczby nasion w kłosach czy strąkach. Nie powstawały rośliny nietypowe (10).

Wpływ działania pola magnetycznego jest znikomy bezpośrednio po zakończeniu ekspozycji i wzrasta z czasem, wykazując maksimum po kilku czy kilkunastu dniach. Ciekawym zjawiskiem jest ochronne działanie pola magnetycznego w stosunku do promieniowania jonizującego i wysokiej temperatury.

Dobroczynne działanie wykazuje także woda poddana działaniu stałego pola magnetycznego. Zwykle „uzdatnia się” wodę przepuszczając w ciągu 10–20 minut pomiędzy biegunami magnesu, w polu o indukcji 1,6–45 mT. W wyniku takiej obróbki następuje zmiana fizycznych i chemicznych właściwości wody, wynikających z uporządkowania dipoli jej cząsteczek. Nasiona moczone w namagnesowanej wodzie kiełkowały lepiej, a wyrosłe z nich rośliny dawały plon o 10% (buraki cukrowe) do 50% (ogórki) wyższy. Nawadnianie plantacji namagnesowaną wodą skraca okres wegetacji roślin, co pozwoliło w Japonii uzyskać rocznie trzeci pokos ryżu a także zwiększa plony. Powoduje również zmniejszenie zapotrzebowania roślin na wodę, wynoszące nawet kilkanaście procent, co podwyższa znacząco opłacalność upraw, szczególnie na terenach mających kłopoty z zaopatrzeniem w wodę. Zmniejszenie zapotrzebowania na wodę wynika z lepszego rozwoju systemu korzeniowego oraz zmiany zawartości i rozmieszczenia hormonów wzrostu (11).

Wpływ zmiennego pola magnetycznego niskiej częstotliwości

Pole elektromagnetyczne ekstremalnie niskiej częstotliwości (ELF) obejmuje zakres 0,1–300 Hz. Pole o tej częstotliwości ma zbyt małą energię, aby wywołać efekt termiczny, czyli podnieść temperaturę obiektu w nim się znajdującego lub zerwać mocne wiązania chemiczne w cząsteczkach związków organicznych. Wywołują jedynie efekty nietermiczne, których natura nie jest do chwili obecnej dokładnie zbadana. Największa liczba badań dotyczy pól o częstotliwościach sieciowych (50 lub 60 Hz). Przykładem może być uprawa zbóż w pobliżu przesyłowych linii elektroenergetycznych. Rośliny rosną przez cały okres wegetacji w polu elektromagnetycznym. W przypadku linii przesyłowej o napięciu 110 kV, na poletkach doświadczalnych, na wysokości metra nad ziemią, występuje pole magnetyczne o indukcji 2,56 μ T. Nie jest to wysoka wartość, ale rosnące tam pszenica i pszenżyto pozostawały pod stałym działaniem pola przez kilka miesięcy. Rośliny pszenicy i pszenżyta wschodziły lepiej, wytwarzały więcej kłosów zawierających więcej ziarniaków. Skutkowało to zwiększeniem plonu o 128% dla pszenicy i 83% dla pszenżyta i to w warunkach niesprzyjających uprawie roślin – pod linią zamiast ziemi ornej był zwykły ugor. Efekt stymulacji utrzymywał się, co prawda coraz słabiej, w kolejnych pokoleniach roślin (badania własne – niepublikowane).

Zmienne pola magnetyczne niskiej częstotliwości, podobnie jak pola stałe, korzystnie wpływają na kiełko-

wanie nasion, rozwój roślin, na wielkość i jakość plonu. Korzenie buraków cukrowych wyrosłych ze stymulowanych nasion nie tylko zawierały więcej cukru, ale miały lepszą jakość technologiczną (mniejszą zawartość popiołu i melasotworów), a pszenica wyższą zawartość białek glutenowych (12). Lepsze efekty niż pole 50 Hz dają pola o niższej częstotliwości. Najsilniejszy efekt stymulacji, występujący przy częstotliwości 10 Hz, może wynikać ze zmiany stosunków wodnych komórek, powstałych na skutek zmiany stosunku Ca/K lub wymiany jonowej błon (13). Efekt działania ELF jest szczególnie dobrze widoczny w warunkach stresowych, np. gdy nasiona roślin ciepłolubnych kiełkują w niskiej temperaturze (14). Pole magnetyczne niskiej częstotliwości szczególnie efektywnie zwiększa wigor nasion starych lub uszkodzonych. Podczas przechowywania w nasionach gromadzą się zmiany mutacyjne oraz uszkodzenia spowodowane przez reaktywne formy tlenu. Przypuszcza się, że zmienne pole magnetyczne, uaktywniając proces poreplikacyjnej naprawy aparatu genetycznego oraz podwyższając aktywność enzymów unieczyniających wolne rodniki (np. peroksydazy czy katalazy) przeciwdziała tym procesom a tym samym przedłuża czas życia nasion. Wyższe częstotliwości (powyżej 350 Hz) nie powodują zmian aktywności tych enzymów (15).

Wpływ pola elektromagnetycznego (PEM) o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych

Pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych (0,1 MHz–300 MHz) i mikrofalowych (300 MHz–300 GHz) działa głównie poprzez przekazywanie energii organizmom żywym znajdującym się w zasięgu jego działania. Miarą tego oddziaływania jest tempo pochłaniania właściwego (SAR – Specific Absorption Rate) mierzone w W/kg. Skutkiem tego jest podniesienie temperatury organizmu w całej jego objętości – tak zwany efekt termiczny. Występują także efekty nietermiczne niezwiązane z podniesieniem temperatury. Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości, zwłaszcza mikrofałe, działają głównie na cząsteczki wody. Efekt ich działania zależy zatem od stopnia uwodnienia obiektu. Długotrwała ekspozycja może spowodować odparowanie, a nawet wrzenie wody w całej objętości organizmu. Energia PEM jest dostateczna, aby zwiększyć ruch cząsteczek lub zerwać słabe wiązania chemiczne, występujące np. w centrach aktywnych enzymów. Zaburza to ich budowę przestrzenną i może prowadzić do zmiany specyficzności i szybkości katalizowanych reakcji (16).

Właściwie zastosowane PEM wysokiej częstotliwości zwiększa zdrowotność nasion zabijając znajdujące się na

Tabela 3. Wpływ przemiennego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz, natężeniu 8 kV/m i czasie działania 30 s na plonowanie zbóż (6)

Grupa	LZK %	Liczba nasion twardych %	Liczba roślin nietypowych %	Liczba nasion martwych %	Liczba roślin porażonych przez patogeny grzybowe %
Kontrolna	31	65	3	1	73
Traktowana polem elektromagnetycznym o częstotliwości 2450 MHz	78	15	4	3	30

LZK – laboratoryjna zdolność kiełkowania.

ich powierzchni patogeny bez obniżania zdolności kiełkowania (17). Eliminuje także twardość nasion (tab. 3), może zatem oddać wielkie usługi praktyce rolniczej, nasiennictwu dla którego stanowi to duży problem (18).

Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości mogą wywoływać efekty niekorzystne. Wskazuje na to między innymi fakt, że w komórkach poddanych ich działaniu wytwarzane są znacznie szybciej niż przy wzroście temperatury osiągniętej innymi metodami, białka szoku termicznego (19).

Jak już wspomniano, PEM wysokiej częstotliwości działa nie tylko poprzez efekt termiczny. Powoduje zjawiska, których nie można wytłumaczyć jedynie podwyższeniem temperatury obiektu. Ogrzanie nasion do temperatury powyżej 50°C gorącą wodą lub powietrzem nie wpływa na ich żywotność. Doprowadzenie do tej samej temperatury za pomocą mikrofał obniża ich LZK o 38% (19). Może to wynikać z różnego rozkładu temperatur wewnątrz nasion w przypadku odmiennych sposobów ich ogrzewania.

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA PTAKI

Nie tyle na ptaki, ale w ogóle na zwierzęta migrujące. Poza ptakami, o wędrówkach, których wszystkim wiadomo, jest takich zwierząt całkiem sporo. Należą do nich: owady (np. motyle monarsze), ryby (np. łososie), gady (np. żółwie morskie), ssaki (wieloryby – humbaki). Wszystkie one muszą opanować sztukę nawigacji, aby trafić bezbłędnie do miejsc przeznaczenia odległych czasami o dziesiątki tysięcy kilometrów. Badania sposobów nawigacji zwierząt trwają od wielu lat. Obecnie uważa się, że różne gatunki zwierząt stosują odmienne sposoby nawigacji, a nawet osobniki tego samego gatunku w różnych warunkach wykorzystują różne sposoby.

Niektóre gatunki ptaków posługują się orientacją względem słońca i gwiazd, inne wykorzystują ultradźwięki, niewielkie różnice sił Coriolisa, zależne od długości geograficznej, lub poświatę w podczerwieni intensywniejszą w kierunku równika. Jeszcze inne, szczególnie migrujące nocą, wykorzystują umiejętność czytania linii sił pola magnetycznego Ziemi.

Jeżeli na głowie rudzika (*Erithacus rubecula*), ryżojada (*Dolichonyx oryzivorus*), gołębia (*Columbia livia*), gajówki (*Sylvia borin*), dziwonii (*Sylvia curruca*), słowika szarego (*Luscinia luscinia*) czy australijskiego szklarnika białopiersnego (*Zosterops lateralis*) umieszczony zostanie magnes zaburzający pole geomagnetyczne, tracą one orientację i wybierają kierunek narzucony przez sztuczny magnes. W komórkach zwojowych części węchowej mózgu tych ptaków znaleziono cząstki uznane za kryształy magnetytu – zwane magnetosomami. Mogą być one receptorami pola magnetycznego. Zmiany położenia tych cząstek, spowodowane zmianami pola magnetycznego, indukują impulsy nerwowe. Mogą także powodować zmiany reakcji chemicznych i stymulować tworzenie wolnych rodników. Magnetosomy są produktem naturalnych reakcji chemicznych mózgu. Występują lokalnie i nie znaleziono ich w innych częściach mózgu (20). Pomimo że magnetosomy znajdują się w węchowej części mózgu, zmysł magnetyczny nie jest sprzężony z węchem. Przecięcie nerwów węchowych nie spowodowało utraty tej cechy. Natomiast po przecięciu nerwów wzrokowych (bocznej gałęzi nerwu trójdzielnego) ptaki traciły zdolność percepcji pola magnetycznego. Ptasi kompas nie odróżnia północy magnetycznej od południa magnetycznego. Drozdki okularowe (*Catharus ustulatus*) i drozdki szarolice (*Catharus minimus*) umieszczone w zmiennym polu magnetycznym wskazującym wschód zamiast północy poleciały początkowo na zachód. Jednak już następnej nocy obrały właściwy kierunek, co może świadczyć, że o zachodzie słońca skalibrowały swój kompas magnetyczny za pomocą wzoru spolaryzowanego światła, powstającego, gdy słońce chowa się za horyzont. Wydaje się, że bagienniki żółtobrewne (*Passerculus sandwichensis*) wykorzystują w tym celu ułożenie gwiazd. Dzięki zdolności kalibracji ptaki mogą utrzymywać właściwy kierunek podróży po przekroczeniu równika.

Mechanizm zmysłu magnetycznego nie ogranicza się jedynie do ruchu magnetosomów. W komórkach siatkówki ptaków, szczególnie ptaków migrujących, znajduje się specyficzny barwnik, receptor światła niebieskiego i UV, kryptochrom. Jest to flawoproteid, o sekwencji aminokwasów przypominającej fotolizy,

znajdujący się w cytoszkielecie komórki – cytosolu (21). U ssaków związek ten odpowiada za regulację rytmu dobowego. Kryptochromy przekształcają zredukowany dinukleotyd flawinoadeininowy (FADH) w barwnik. Reakcja ta jest aktywowana światłem. Omawiany barwnik nie występuje wcale (lub w znikomych ilościach) u ptaków niemigrujących, a zatem niepotrzebujących magnetycznego kompasu (22). Kryptochromy są szczególnie użyteczne dla ptaków migrujących nocą, np. gajówek. Maksymalna ekspresja kodujących je genów (CRY 1) następuje u ptaków migrujących nocą właśnie o tej porze. Podczas gdy w tym samym czasie u ptaków niemigrujących np. kury domowej (*Hen domestica*) jest niemal równa zeru. Podczas dnia ekspresja tych genów jest jednakowa u wszystkich gatunków ptaków. Kryptochrom jest receptorem światła niebieskiego. Dlatego ptaki w świetle o tej barwie, a także w świetle zielonym, zachowują się normalnie, natomiast w świetle czerwonym tracą zmysł magnetyczny (23). Być może z powodu swojego magnetycznego zmysłu nawigacyjnego ptaki uważane są za zwierzęta szczególnie wrażliwe na działanie PEM (24). Ptaki unikają miejsc o podwyższonym tle pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości (25).

Pole magnetyczne wysokich częstotliwości i o krótkim czasie działania (radar) nie wpływa na percepcję pola geomagnetycznego przez migrujące ptaki i nie zaburza ich orientacji przestrzennej. Również pole elektryczne stałe i niskiej częstotliwości nie zaburza ptasiej detekcji pola geomagnetycznego (26).

Możliwe, że oba opisane powyżej mechanizmy uzupełniają się: kryptochromy służą do wyczuwania położenia bieguna magnetycznego Ziemi, a kryształy magnetytu do określenia położenia geograficznego, służąc raczej jako mierniki intensywności pola geomagnetycznego. Ptaki mogą zmierzyć nie tylko intensywność pola, ale także inklinację (kąt pomiędzy igłą kompasu a linią horyzontu) i deklinację (kąt pomiędzy północą magnetyczną a geograficzną). Pozwala im to bardzo dokładnie określić swoją pozycję (27).

Struktury podobne do magnetosomów, pozwalające wykrywać i wykorzystywać pole geomagnetyczne, posiadają żółwie morskie (np. żółwie kareta – *Caretta caretta*), tuńczyki żółtopłetwe (*Thunnus albacares*), tuńczyki białe (*Thunnus alalunga*) kety (*Onhorhynchus keta*), łososie pacyficzne (*Oncorhynchus nerka*), łososie atlantyckie (*Salmo salar*), węgorze europejskie (*Anguilla anguilla*), węgorze amerykańskie (*Anguilla rostrata*), makrele atlantyckie (*Sarda sarda*), makrele bałtyckie (*Scomber scomber*), okonie (*Percea fluviatilis*), śledzie bałtyckie (*Clupea harengus*), pstrągi tęczowe (*Oncorhynchus mykiss*).

chus mykis) i karpie (*Cyprinus carpio*.) zatem nie tylko ryby znane ze swych dalekich migracji (28). Jednak nie wszystkie ryby kierują się magnetycznym kompasem. Niektóre gatunki wykorzystują w swych wędrówkach, zapach a właściwie skład chemiczny wody (29).

Żółwie morskie (np. kareta – *Caretta caretta*, żółw zielony – *Chelonia mydas*, tora – *Dermochelus coriacea*), w taki sam sposób jak ptaki wędrownie kierują się w swych wędrówkach subtelnymi zmianami ziemskiego pola magnetycznego, które potrafią wyczuwać. Pozwala im to określić swoją pozycję oraz obrać właściwy kierunek ruchu (30).

Zmysł magnetyczny odkryto także u bezkręgowców: owadów (szczególnie pszczoł i os) i mięczaków. Pszczoły miodne (*Apis mellifera*) zapamiętują położenie źródła pokarmu względem linii sił pola magnetycznego i informacją tą dzielą się z siostrami podczas tańca. Percepcje pola magnetycznego umożliwiają im małe cząstki ferromagnetyczne, znajdujące się w drugim segmencie odwłoka. Dlatego właśnie na aktywność neuronów tej części ciała może mieć wpływ pole geomagnetyczne Ziemi lub sztuczne zewnętrzne pole magnetyczne. Uważa się, że antenami wychwytyjącymi nawet minimalne zmiany pola magnetycznego są włoski na odwłoku owadów (31). Zmysł magnetyczny pszczoł najważniejszy jest podczas wyroju. Pozwala rojowi potomnemu obrać kierunek, z którego przybyli jego rodzice. Pole o natężeniu 25 μT całkowicie znosi magnetoorientację tych owadów. Podobne cząstki ferromagnetyczne znaleziono także u mrówek. Pomagają im one odnaleźć drogę do mrowiska podczas powrotu z wędrówek. Poza interferencją cząstek ferromagnetycznych z ziemskim polem magnetycznym, rozpoznawanie przez owady żyjące w społecznościach pola magnetycznego tłumaczone jest modyfikacją sposobu widzenia owadów przez wolne rodniki zależne od pola magnetycznego oraz indukcję, przez zmienne pole magnetyczne, pola elektrycznego, działającego na układ nerwowy owadów (32). Motyle monarsze, pokonujące każdego roku, podobnie jak ptaki, tysiące kilometrów, także posługują się naturalnym kompasem. Pozbawione pola magnetycznego zaczynają latać chaotycznie lub w kierunku odmiennym od prawidłowego (33).

Węgorz elektryczny (*Electrophorus electricus*), ryba żyjąca w słodkich wodach Ameryki Południowej, wyczuwa najdrobniejsze zmiany pola elektrycznego i według nich orientuje się w otoczeniu. Żyjące w wodach Afryki mruki (np. Trąbonos Petersa – *Gnathonemus petersii*) używają do nawigacji pola elektrycznego. Wytwarzają one krótkie impulsy elektryczne tworzące pole elektrycz-

ne, modyfikowane przez wszelkie podwodne przeszkody (żywe i nieożywione) – taka elektryczna echolokacja. Zmiany pola elektrycznego rejestrowane są przez receptory znajdujące się w dolnej szczęce ryby (34).

Także wieloryby kierują się w swych wędrówkach zmianami pola magnetycznego Ziemi, chociaż mechanizm ich percepcji nie został jeszcze wyjaśniony. Sugeruje się, że znane samobójstwa wielorybów spowodowane są z jednej strony preferencją do wybierania miejsc o odmiennym od naturalnego polu, z drugiej strony utratę, wskutek natknięcia się na zbyt silne sztuczne pola magnetyczne, naturalnej orientacji (35).

PEM wysokiej częstotliwości wydaje się nie mieć negatywnego wpływu na ptaki. Przesiadują, bowiem na antenach nadawczych stacji bazowych telefonii komórkowej, a badania dziuplaków wykazały, że PEM o częstotliwościach radarowych nie działa negatywnie na gniazdowanie (liczbę, kondycję i szybkość rozwoju piskląt) jaskółki drzewnej (*Tachycineta bicolor*), muchołówki żałobnej (*Ficedula hypoleuca*), pustółki amerykańskiej (*Falco sparverius*) (36), sikory bogatki (*Parus major*) i sikory modraszki (*Parus caeruleus*). Jednak dane dotyczące wpływu pól elektromagnetycznych na reprodukcję ptaków nie są jednoznaczne. Jedni autorzy wykazują wzrost liczby składanych jaj podczas ekspozycji (37). Inni stwierdzają zmniejszenie nieśności, spadek liczby zapłodnionych jaj, mechanicznej odporności skorup jaj nawet przy ekspozycji na pola niewywołujące efektów termicznych pola (37).

PEM wysokich częstotliwości, charakterystycznych dla stacji bazowych telefonii komórkowej (900 i 1800 MHz) wpływają na gniazdowanie i zachowania lęgowe ptaków (porzucanie niedokończonych gniazd, braki w konstrukcji gniazd, brak jaj w gniazdach). Dotyczy to gniazd znajdujących się w odległości do 300 m od źródeł pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości stacji bazowych telefonii komórkowej. W przypadku większych odległości, gdy wartości pól są mniejsze niż 0,5 V/m niekorzystnych zmian w zachowaniach i reprodukcji ptaków nie stwierdza się (38). Praca, dotyczących nieśności i zachowań gniazdowych ptaków jest niewiele a cytowana praca stanowi pojedyncze doniesienie wskazujące na tak duży wpływ PEM.

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ZWIERZĘTA WYŻSZE

Zwierzęta reagują na PEM w inny sposób niż rośliny. Współdziałanie zewnętrznego pola elektrycznego z prądami występującymi w organizmie może wpłynąć

na pracę serca i przewodzenie nerwowe. Zmiany w obrazie EKG obserwowano przy działaniu silnych pól, o indukcji powyżej 1 T. Oddziaływanie na stany spinowe elektronów występują przy działaniu niewielkich pól, o indukcji już 5 mT, zaburzając reakcje chemiczne zachodzące w organizmie, np. utlenianie lipidów błon komórkowych. Opublikowane dotychczas prace nie pozwalają jednoznacznie określić pierwotnego miejsca działania PEM, chociaż coraz powszechniej uważa się, że są nimi układ nerwowy i układ odpornościowy. Nie ustalono także jednoznacznie wartości progowych, przy których pojawiają się efekty biologiczne, ani dawek bezpiecznych (39).

Wpływ pól elektrycznych niskiej częstotliwości

Działanie żywego organizmu związane jest z generowaniem zjawisk bioelektrycznych. Przewodnictwo nerwowe jest tego modelowym przykładem. Depolaryzacja (pobudzenie) błony komórkowej wywołuje przepływ prądu skierowany wzdłuż neuronu, który dopływa do synapsy i wpływając na nią może kierować czynnościami innych komórek, np. mięśniowych. Biopotencjały powstają także podczas pracy mięśni, np. mięśnia sercowego. Serce jest źródłem zmiennego pola elektrycznego, które obejmuje cały organizm i zmienia się w rytmie jego pracy. Biopotencjały poszczególnych typów komórek różnią się od siebie. Na wewnętrzne pole elektryczne organizmu może wpływać zewnętrzne pole elektryczne, magnetyczne czy elektromagnetyczne.

Działanie pola elektrycznego niskiej częstotliwości nie może być tłumaczone efektem termicznym. Jego działanie nie powoduje bowiem wzrostu temperatury obiektu. Pole elektryczne o natężeniu 30–100 kV/m nie powoduje zmian fizjologicznych dotyczących składu krwi (mysz, szczur, królik, świnka morska), poziomu hormonów krwi, masy ciała, nieprawidłowości budowy komórek mózgu i innych narządów wewnętrznych, odpowiedzi immunologicznej, zwiększonej zapadalności na choroby, skrócenia czasu życia, czy zwiększonej śmiertelności nawet przy długotrwałym działaniu (40). Zmienne pole elektryczne o częstotliwości 60 Hz i natężeniu 1,7–65 kV/m stosowane przez 2–3 tygodnie obniża poziom melatoniny, ale wraca on do normy w 3 dni po przerwaniu ekspozycji. Pole o niskiej częstotliwości nie wpływa ujemnie na rozrodczość zwierząt doświadczalnych oraz kondycję potomstwa. Podobny brak efektów obserwowano w przypadku ekspozycji ciężarnych samic. Pole 30 kV/m nie powodowało negatywnych zmian u trzech pokoleń ekspozowanych szczurów (41). Śmiertelność w pierwszym pokoleniu była nawet

znacząco mniejsza niż w grupie kontrolnej. Pole 30–60 kV/m nie powoduje zmian zachowań socjalnych zwierząt stadnych, np. małp (42).

Zdolność wytwarzania i wyczuwania pola elektrycznego może przynieść zwierzętom poważne korzyści. Niektóre zwierzęta zdolne są do produkcji, nawet silnych pól elektrycznych. Wspomniany już węgorz elektryczny wytwarza prąd o napięciu do 600 V, porażający ofiary i niebezpieczny dla człowieka. Zapas energii magazynowany w ogonie węgorza pozwoliłby zapalić kilkanaście żarówek. Ryby wytwarzające wokół siebie słabe pole elektryczne mogą wykryć potencjalne ofiary, wyczuwając ich pole elektryczne, a właściwie spowodowane przezeń subtelne zmiany naturalnego pola elektrycznego. Korzystają z tego, aby ustalić ich położenie i upolować je (43).

Wpływ stałego pola magnetycznego

Stale pole magnetyczne może indukować przepływ przez organizm, znajdujący się w polu jego działania, prądu elektrycznego. Pola o indukcji poniżej 1,5 T nie powodują niekorzystnych zmian behawioralnych i socjalnych myszy, szczurów i małp, nawet przy długotrwałej ekspozycji. Podobnie nie mają wpływu na termoregulację i cykl dobowy (44).

Stale pole magnetyczne podwodnych linii przesyłowych o indukcji 3,7 mT, działające nawet przez wiele tygodni, nie wywiera (niekorzystnego) wpływu na faunę denną: narybek flądry (*Pleuronectes flesus*), krabika amerykańskiego (*Rhithropanopeus harrisi*), omułka (*Mytilus edulis*), podwoja (*Saduria entomon*) i garnełę pospolitą (*Crangon crangon*) (45).

Obserwuje się także negatywne skutki. Pole o indukcji 1,6 T, działając przez 30 dni, zmniejsza liczbę plemników i komórek jajowych myszy wskutek zmian komórek nabłonka rozrodczego, a zatem negatywnie wpływa na rozrodczość zwierząt. Jest to efekt odwracalny. Powrót do normalnej liczby komórek następuje po około miesiącu od ustania ekspozycji (46).

Silniejsze pole magnetyczne, o indukcji 2–5 T, powoduje zmiany właściwości bioelektrycznych komórek nerwowych. Może to zaburzać pracę mięśni szkieletowych, czy, co jest znacznie bardziej niebezpieczne, mięśnia sercowego. Zmiany w obrazie EKG obserwowano u zwierząt doświadczalnych już przy indukcjach rzędu 0,1 T. Wzmagają się przy 0,3 T i rosną liniowo do 2,1 T, nie powodując arytmii ani wzrostu ciśnienia krwi obwodowej (47).

Jeszcze silniejsze pola, o indukcji powyżej 7T, są bardziej niebezpieczne. Powodują zmianę proporcji

płci muszki owocowej (*Drosophila melanogaster*), zaburzenia w rozwoju zarodków jaj kurzych i jaj gupików (*Lebistes reticulatus*) (48) oraz znaczące zmniejszenie zapłodnienia jaj żółwi (49). Efekty te spowodowane są prawdopodobnie wywołanymi przez pole magnetyczne zmianami pobierania tlenu lub aktywności cytochromów mitochondrialnych komórek jajowych. Nie powodują efektów letalnych ani zmiany zachowań owadów społecznych (pszczoły), chociaż wywołują zmiany biochemiczne. Obserwowane jako skutek ekspozycji pól magnetycznych o wysokich indukcjach zmiany stężenia wolnych i związanych fosfolipidów wskazują na zmiany dezintegracyjne i brak stabilności błon komórkowych oraz aktywności enzymów błonowych i innych enzymów komórkowych. Nie zaburzają syntezy DNA ani nie zmieniają struktury chromosomów (50).

Wpływ pola magnetycznego niskiej częstotliwości

Wyniki ponad 200 różnych doświadczeń przedstawione w 60 publikacjach nie dowodzą, aby pole magnetyczne 50 Hz, nawet przy długotrwałej ekspozycji, powodowało skutki karcinogenne czy genotoksyczne u zwierząt doświadczalnych. Nie wykazano takiego efektu przy indukcji pola poniżej 10 mT, nawet przy wielomiesięcznej ekspozycji (51). Brak również, nawet przy wysokich indukcjach pola, skutków genetycznych, takich jak: podwyższenie częstości mutacji, wymiany chromatyd homologicznych, zmian chromosomowych w komórkach rozrodczych (52), czy zmian genotoksycznych u mysich noworodków. Pole o indukcji 0,5–5 mT nie zwiększa częstości mutacji u 40 pokoleń muszki owocowej (53).

Pola o indukcji nie przekraczającej 5mT nie powodują proliferacji komórek w komórki nowotworowe (54). Jednak pewne dane z doświadczeń wskazują, że może ono być kopromotorem nowotworzenia i dlatego WHO umieściła je w grupie ryzyka I/A. Według Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) w grupie 2B, czyli substancji przypuszczalnie onkogennych dla człowieka, PEM znajdują się w tej samej grupie substancji co, m.in., DDT, gazy spalinowe, chloroform, sacharoza czy związki ołowiu (55).

Mikrofale mogą mieć niekorzystny wpływ na zdolności rozrodcze zwierząt. Samce szczurze ekspozowane na pole 50Hz; 2,5 μ T przez 18 tygodni nie wykazywały zmian wagi ciała ani masy jąder. Spadała masa nasieniowodów, przyjąder i liczba plemników, a w czasie 6–12 tygodni obserwowano spadek zawartości testosteronu, czyli pole wykazywało niekorzystny wpływ na reprodukcję (56). Samce i samice myszy poddane działaniu pola o częstotliwości 50 Hz i indukcji 2,5 μ T nie wykazywały

zmniejszenia płodności na 90 dni przed zapłodnieniem przez nieekspozowanego na PEM partnera (57). Liczba ploidów i płodność potomstwa pozostawały bez zmian. U samic potomnych obserwowano natomiast spadek masy jajników (58). Czasami pola magnetyczne działają wybiórczo. Silne pole, o indukcji 11 mT, działające na różne stadia larwalne muszki owocowej powoduje, zarówno u samic jak i u samców, zmiany mutacyjne, dotyczące budowy skrzydeł. Są one spowodowane zmianą transkrypcji genów ściśle określonego fragmentu chromosomu (59).

Podobnie jak w przypadku pola elektrycznego działanie pola magnetycznego niskiej częstotliwości jest kontrowersyjne. Różne prace dają odmienne wyniki.

Nawet silne pola magnetyczne nie są zabójcze dla zwierząt. Myszy żyjące przez czas od kilku minut do kilku godzin w polu o indukcji 12 T przeżyły, nie wykazując objawów chorobowych czy zmian fizjologicznych (60).

Jednak w przypadku długotrwałego działania, silne pola powodują zmiany zachowania zwierząt; szybkości uczenia się, czasy reakcji, wrażliwości na bodźce, aktywności ruchowej, obyczajów społecznych (61).

Przemienne pole magnetyczne ekstremalnie niskiej częstotliwości (1–75 Hz) może: przyspieszać wzrost i skracać czas podziału oraz zmieniać metabolizm składników organicznych komórek (62), zmieniać odpowiedź komórek na działanie hormonów i mutagenów (63), wpływać na genetyczną regulację funkcji komórek (64), powodować morfologiczne zmiany w tkankach, często zanikające po przerwaniu ekspozycji (65), zwiększać odporność na infekcje (66).

Wpływ pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości

Podobnie jak na rośliny wpływ PEM wysokich częstotliwości na zwierzęta polega głównie na absorpcji energii przez ich organizmy. Zwierzęta stałocieplne mają ograniczony zakres termoregulacji. Jeżeli bilans cieplny ustroju przekroczy określony poziom następuje stopniowy wzrost temperatury ciała. Ekspozycja w PEM dostarcza dodatkowej energii cieplnej, z którą organizm na ogół dobrze sobie radzi, uruchamiając odpowiednie mechanizmy termoregulacyjne (67). Dopiero po przekroczeniu zdolności regeneracyjnych organizmu następują w nim zmiany fizjologiczne, prowadzące do rozwoju choroby.

Pola o SAR niepowodującym jeszcze wzrostu temperatury ciała, wywołują nieswoiste reakcje stresowe, objawiające się zmianami stężenia hormonów (np. ty-

roksyny i kortykosteroidów), czy zmianami aktywności zakończeń nerwowych mózgu. Objawy takiego nieswoistego, stresu stwierdzono u zwierząt doświadczalnych, poddawanych długotrwałej ekspozycji na PEM. Objawami tymi są: nerwice wegetatywne, zmniejszenie płodności samic, zwiększona liczba wczesnych poronień, zmniejszona waga żywo urodzonych płodów i osłabienie funkcji układu odpornościowego. Nie wykazują one zależności od warunków ekspozycji ani liniowej zależności od dawki PEM. Nie stwierdzono, nawet w długotrwałych badaniach dotyczących dużych grup zwierząt, zespołów chorobowych, charakterystycznych dla ekspozycji na PEM (68).

Silne pola elektromagnetyczne o częstotliwości 2450 MHz i gęstości strumienia energii 10mW/cm² (co odpowiada SAR 6,8 W/kg) znacząco skracają czas życia zwierząt doświadczalnych. Słabsze pola o SAR poniżej 2 W/kg nie dawały takich efektów. Przykłady efektów biologicznych wywoływanych przez pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości przedstawiono tabeli 4.

Ekspozycji na PEM wysokiej częstotliwości towarzyszy czasowe obniżenie poziomu przemiany materii. Efekt ten zależy od temperatury otoczenia. W niższej temperaturze następuje szybciej. Powraca do normy w ciągu kilku minut po zakończeniu ekspozycji (8).

Wyniki badań przeprowadzonych *in vitro* na różnych typach komórek wskazują, że pierwotnym miejscem oddziaływania PEM są błony komórkowe. Pod

Tabela 4. Przykłady efektów biologicznych wywoływanych przez pole elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości (39)

Rodzaj efektu	Obiekt	SAR w/kg	Przyrost temperatury °C
Zaćma soczewki	królik	100–150	3–6
Wady wrodzone	szczur	6–10	2–3
Reakcje hormonalne	szczur, naczelne	3–4	1–2
Upośledzenie wykonywania wyczynowych czynności	naczelne, szczur	2–5	1
Obniżenie aktywności lokomotorycznej	naczelne	1–3	poniżej 1
Uruchomienie mechanizmów termoregulacyjnych	naczelne	0,7–1	poniżej 1
Obniżenie poziomu przemiany materii	naczelne	0,7–1	poniżej 1
Sensacje słuchowe	człowiek, szczur	0,01–0,1	brak
Zmiany w EKG	królik	0,01–0,5	brak
Zwiększona przepuszczalność bariery krew/mózg	szczur, królik	0,05–0,1	brak

SAR – miara oddziaływania pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych na obiekty biologiczne.

wpływem działania pola następują zaburzenia działania pompy sodowo-potasowej i transportu jonów (69). Zahamowanie błonowego transportu jonów sodu i potasu może stymulować efekty wtórne w postaci zmian aktywności enzymów syntezy kwasów nukleinowych i białek, a to może wywołać kaskadę dalszych efektów fizjologicznych. Zmiana aktywności kanałów wapniowych, czyli wypływu jonów wapnia, prowadzi do zmian przewodnictwa impulsów w neuronach. Doprowadzić to może do zaburzeń działania wegetatywnego systemu nerwowego objawiającego się np. zaburzeniami pracy serca. Występują zmiany aktywności lokomotorycznej i opóźnienie reakcji na sytuacje alarmowe. Efekty te obserwowane są zwłaszcza przy długotrwałych ekspozycjach na słabe pola (SAR poniżej 0,5 W/kg). Silniejsze pola powodują wzrost temperatury tylnej ściany soczewki oka do 43°C termiczne uszkodzenie soczewki oka – zaćmę (70).

W świetle wyników dotychczasowych badań pole elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości uznane jest za dość słaby czynnik biologiczny. O niekorzystnych efektach działania PEM wysokiej częstotliwości świadczy fakt syntetyzowania w komórkach organizmów znajdujących się pod ich wpływem białek szoku cieplnego (71).

Tabela 5. Efekty działania nietermicznych pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości na organizmy żywe (39)

Efekty prawdopodobne	
Na poziomie komórki	Na poziomie organizmu
– zmiany w transporcie jonów przez błony komórkowe	– nieswoista reakcja stresowa
– zmiany metabolizmu energetycznego komórki	– efekty słuchowe
– zmiany proliferacji komórek	– uruchomienie mechanizmów termoregulacyjnych
– zmiany czynności wydzielniczych komórek	– upośledzenie sprawności intelektualnej
Efekty możliwe	
– zakłócenie działania komórek układu odpornościowego	– zmiany czynności bioelektrycznych mózgu
– współdziałanie z promotorami procesu nowotworowego	– zmiany przepuszczalności bariery krew/mózg
– zmiany przewodnictwa nerwowego	– osłabienie odporności organizmu
Efekty wątpliwe	
– uszkodzenie struktur komórkowych	– uszkodzenie narządów wewnętrznych
– mutacje	– choroby organiczne
	– wady wrodzone
	– inicjacja nowotworzenia

PEM o częstotliwości 915 MHz powoduje znaczące zmiany w kondensacji chromatyny, ale nie powoduje uszkodzeń ani pęknięć DNA. Wpływa zatem na ekspresję genów ale nie ma działania mutagennego.

Wyniki wielu badań wymagają weryfikacji i potwierdzenia, czy obserwowane efekty są naprawdę nietermicznym skutkiem działania PEM, czy też efektem niewielkiej hipertermii. Efekty działania nietermicznych pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości na organizmy żywe przedstawiono w tabeli 5.

Liczne badania dotyczące PEM różnych częstotliwości, różnej długości czasu ekspozycji prowadzone dla różnych gatunków zwierząt doświadczalnych, nie wykazały obniżenia odporności i zwiększonej śmiertelności (71) oraz zwiększenia zapadalności na różnego typu nowotwory nawet w przypadku ich implantowania (72). Wykazano zahamowanie naprawy DNA w komórkach mózgu szczurów eksponowanych na pole 2,45 GHz i gęstości strumienia energii 1–2 mW/cm² (73).

Większość efektów działania PEM wysokiej częstotliwości, obserwowanych u zwierząt, można wytłumaczyć działaniem czynników stresogennych. Dobrze poznane i opisane są termiczne efekty PEM o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych. Reakjom termoregulacyjnym organizmu mogą towarzyszyć zmiany behawioralne, takie jak obniżenie aktywności lokomotorycznej i upośledzenie wykonywania czynności wyuczonych. PEM wysokiej częstotliwości jest czynnikiem stresogennym, uruchamiającym reakcje adaptacyjne związane ze zmianami wydzielania hormonów.

Naturalne i sztuczne pola elektromagnetyczne w środowisku człowieka mają różne częstotliwości, różne natężenia, a w związku z tym różne mechanizmy działania i wpływ na organizmy żywe. Odmienne reagują rośliny i zwierzęta. Występują duże różnice gatunkowe, a nawet odmianowe w reakcjach, szczególnie u roślin.

Ryzyko negatywnych skutków biologicznych ekspozycji w polach elektromagnetycznych o wartościach występujących w środowisku człowieka nienarażonego zawodowo jest niewielkie. Jest ono nieporównywalnie niższe niż ryzyko związane z narażeniem na substancje chemiczne (sole metali ciężkich, rozpuszczalniki organiczne, dym papierosowy), czy promieniowanie ultrafioletowe (szczególnie podczas plażowania).

PIŚMIENNICTWO

1. Murr L.E.: Biophysics of plant growth in an electrostatic field. *Nature*, 1965;206:467–470
2. Kleimenova N.S. Current concepts on the nature of high frequency variation of earth's electromagnetic fields. *Izv. Av. SSR*, 1963;12:1798–1813
3. Hassenzahl W., Matraffy M., Weintrafen J.: Evaluation of environment control technologies of magnetic field. National Technical Information Service (NTIS) Report DOE/EV 0029, 1978 [cytowany 14 grudnia 2006]. US Department of Energy, Springfield.

Adrtes: http://www.who.int/entity/peh-emf/publications/11/references/EHC_232.pdf

4. Dattilo A.M., Bracchini L., Loisselle S.A., Ovidi E., Tiezzi A., Rossi C.: Morphological anomalies in pollen tubes of *Actinidia deliciosa* (kiwi) exposed to 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 2006;26:153–156
5. Ellis H.W., Turner E.R.: The effect of electricity on plant growth. *Sci. Prog. Oxford*, 1978;65:395–407
6. Kopeć B.: Wykorzystanie energii pola elektrycznego dla przedsięwziętej obróbki nasion. *Post. Nauk. Rol.*, 1988;3:51–64
7. Davies M.S.: Effects of 60 Hz electromagnetic fields on early growth in three plant species and replication of previous results. *Bioelectromagnetics*, 1996;17:154–161
8. Soja G., Kunsch B., Gerzabek M., Reichenauer T., Soja A.M., Rippar G. i wsp.: Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mays* L.) near a high voltage transmission line. *Bioelectromagnetics*, 2003;24:91–102
9. Kobayashi M., Soda N., Miyo T., Ueda Y.: Effects of combined DC and AC magnetic fields on germination of hornwort seeds. *Bioelectromagnetics*, 2004;23:352–359
10. Lebedev S.I., Baransky P.I., Litvinenko L.G., Sluyan L.T.: Physiological-biochemical characteristics of plants after predposure to a constant magnetic field. *Fiziol. Rastenij*, 1975;22:69–75
11. Fernandez L., Teran Z., Leon M.: The effect of magnetically treated irrigation water to quality of onion seedlings growth in zeonics. *Cultivos Tropicales*, 1996;17:55–59
12. Pietruszedki S.: Effects of magnetic biostimulation of wheat seeds on germination, yield and protein. *Int. Agrophys*, 1996;10:51–55
13. Fisher G., Tausz M., Kock M., Grill D.: Effect of weak 16 2/3 magnetic field on growth parameters of young sunflower and wheat seedlings. *Bioelectromagnetics*, 2004;23:638–641
14. Rochalska M.: Wpływ zmiennego pola magnetycznego niskiej częstotliwości na kiełkowanie nasion w niskiej temperaturze. *Zeszyty problemowe Post. Nauk Rol.*, 1997;439:31–35
15. Portaccio M., De Luca P., Durante D., Grano V., Rossi S., Bencivenga U. i wsp.: Modulation of the catalytic activity of free and immobilized peroxidase by extremely low frequency electromagnetic fields dependence on frequency. *Bioelectromagnetics*, 2005;26:145–152
16. Sieroń A. [red.]: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. A-medica Press, Bielsko-Biała 2002
17. Adair R.K.: Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 2003;24:39–48
18. Nelson S.O.: RF and microwave energy for potential agricultural applications. *J. Mirow. Power*, 1985;28:65–70
19. Ballard L.A.T., Nelson S.O., Buchwald S.O., Sterson L.E.: Effects of radiofrequency electric field on permeability to water some legume seeds. *Seed. Sci. Tech.*, 1976;4:257–274
20. De Pomerai D., Daniels C., David H., Allan J., Ducey I., Mutwakil M.: Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature*, 2000;405:417–418
21. Hanvin L., Sands D.C.: Microwave treatment of tobacco seeds to eliminate bacteria on seeds surface. *Phytopathology*, 1977;67:794–795

22. Bindhi V.V.: Stochastic dynamics of magnetic nanoparticles and a mechanism of biological orientation in geomagnetic field [cytowany 27 grudnia 2004]. University of Southampton. Adres: http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0412/0412158.pdf
23. Cashmore A.P., Janillo J.A., Wu Y.J., Liu D.: Cryptochromes, blue light receptors for plant and animals. *Science*, 1999;284:760–765
24. Ritz T., Dommer D.H., Phillips J.B.: Shedding light on vertebrate magnetoreceptors. *Neurtron*, 2002;34:503–506
25. Liboff A.R., Jenrow K.A.: New model for the avian magnetic compass. *Bioelectromagnetics*, 2000;21:555–556
26. Steiner I., Bruderer B.: Initial orientation and homing behaviour of pigeon under the influence of short wave transmission. *J. Ornithologie*, 1999;140:165–177
27. Emlen S.T., Emlen J.T.: A technique for recording migratory orientation of captive birds. *Auk*, 1966;83:361–367
28. Walker M.M., Diebel C.T., Haugh C.V., Panhurst P.M., Montgomery J.C., Green C.R.: Structure and function of vertebrate magnetic sense. *Nature*, 1997;390:371–386
29. Tesch F.W., Wendt T., Karlsson L.: Influence of geomagnetism and salinity on orientation of the eel *Anguilla anguilla* L. *Ecol. Freshwater*, 1974;1:52–60
30. Papi F., Luschi P., Akesson S., Capogrossi S., Hays G.C.: Open-sea migration of magnetically disturbed turtles. *J. Exp. Biol.*, 2000;2003:3435–3443
31. Schiff H.: Effect of weak ELF electromagnetic field in biological systems and the magnetic sense of honeybees. *Trend Comp. Biochem. Physiol.*, 2002;9:33–52
32. Darci S.: Social insects and Earth's magnetic field magnetite in bees and ants. *Ciencia Al Dia Int.*, 2000;2:12–14
33. Etheredge J.A., Peres S.M., Taylor O.R., Jander R.: Monarch butterflies use a magnetic compass to navigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1999;96:13845–13846
34. Domagała T.: *Gnatonemus petersii* – elektryczna ryba rodem z Afryki [cytowany 15 listopada 2006]. Fundacja Oceanarium Warszawskie, Warszawa. Adres: http://www.oceanarium.org.pl/Gnatonemus_petersii.htm
35. Walker M.M., Kirchviak J.L., Gufran A., Dictioni A.E.: Evidence that fin whales respect to the geomagnetic field during migration. *J. Exp. Biol.*, 1992;171:67–79
36. Fernie K.J., Bird D.M.: Effect of electromagnetic field on growth of nestling of American kestrel. *Condor*, 2000;102:461–465
37. Mazgajski T., Rejt Ł., Kubacki R., Kieliszek J., Sobiczewska E., Szmigielski S.: Ocena oddziaływania pól elektromagnetycznych (PEM) wysokich częstotliwości obecnych w środowisku na wybrane elementy biologii lęgowej dziuplaków. I Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko rolnicze” Agrolaser 2001;26–28 września 2001; Lublin. Akademia Rolnicza, Lublin 2001, ss. 71–76
38. Balmori A.: Possible effects of electromagnetic field from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*). *Electromag. Biol. Med.*, 2005;24:109–119
39. Sokolska G., Szmigielski S.: Efekty biologiczne pól radio i mikrofalowych w badaniach doświadczalnych. Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”; 18–22 października 1993; Zakopane. Polskie Towarzystwo Badań Radiologicznych, Warszawa 1993, ss. 101–122
40. Kause W.T.: Introduction to power-frequency electric and magnetic field. *Environ. Health Perspect.*, 1997;101:73–81
41. Kause W.T., Phillips R.D.: Comparison of the coupling of grounded human, swine and rats to 60 Hz electric fields. *Bioelectromagnetics*, 1980;1:117–123
42. Gavalos R.J., Walter d.O., Hamer J., Adey R.W. Effect of low-level low-frequency electric fields on EEG and behaviour in *Macaca Nevostrina*. *Brain Res.*, 1970;18:491–501
43. Whitfield P.: Electric eel. *Mc Millan Illustrated Animal Encyclopedia*. Mc Millan Press New York, 1984, s. 512
44. Nakagawa M., Murroya H., Matsuda Y., Tsakumoto H.: Effects of static magnetic field on some lipid and protein metabolism processes in rabbits. *J. Trans. Med.*, 1980;34:375–384
45. Kullnick W.H.: Influences of electric and magnetic fields on aquatic ecosystems. Proceedings of the International Seminarium on Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment; 4–5 października 1999, Immaning, Germany. International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, Oberschleissheim 2000, ss. 113–129
46. Galaktionova G.V., Mastrykova M., Strihizovskaya A.D.: Sensitivity of mammalian tissues to prolonged effects of constant magnetic field of high strength. *J. Kom. Biol. Aviakosm. Med.*, 1985;19:78–81
47. Tenforde T.S., Gaffey C.T., Mayer B.P., Budinger T.F.: Cardiovascular alteration in *Macaca* monkey exposed to stationary magnetic field experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics*, 1983;4:1–9
48. Joshi M.Y., Khan M.Z., Dansie P.S.: Effects of magnetic field on chick morphogenesis. *Differentiations*, 1978;10:39–43
49. Strand J.A., Abernathy C.S., Skalski J.R., Genoway R.G.: Effect of magnetic field exposure on fertilization success in rainbow trout. *Bioelectromagnetics*, 1983;4:295–301
50. Kefuss J., Disayyye M., Bounias M., Vanpoucke J., Ecochard.: Biochemical effects of high intensity constant magnetic field on worker honeybees. *Bioelectromagnetics*, 1999;20:117–122
51. Yasui H.: Carcinogenicity test of 50 Hz magnetic field in rats. *Bioelectromagnetics*, 1997;18:531–540
52. Heredia-Rojas J.A., Caballero-Hernandez D.E.: Lack of alternation meiotic chromosomes and morphological characteristics of male germ cells in mice exposed to a 50 Hz 2 mT magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 2004;25:63–68
53. Kikuchi T, Ogawa M.: Multigeneration exposure test of *Drosophila melanogaster* to ELF magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 1998;19:335–340
54. Grassi C., Ascenzo M.: Effects of 50 Hz electromagnetic fields on voltage-gated Ca²⁺ channels and their role in magnetic field modulation of neuroendocrine cell proliferation and death. *Cell Calcimen*, 2004;35:307–315
55. Szmigielski S., Sobiczewska E.: Pola elektromagnetyczne i nowotwory. *Roczniki WIHE*, 2000; 35 Supl. 2:223–239
56. Al-Akhraa M.A., Dormani H., Elbetiela A.: Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats. *Bioelectromagnetics*, 2006;27:127–131

57. Nakagawa M.: Effets of magnetic field on fertility general reproductive performance and growth of mice. *Jpn. J. Hyg.*, 1979;34:488–495
58. Elbethia A., Ali M., Akhras A., Dormani H.: Long-term exposure of male and female mice to 50 Hz magnetic field effects of fertility. *Bioelectromagnetics*, 2002;23:168–172
59. Azarnia C.: Developmental changes in *Drosophila melanogaster* following exposure to alternating electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 2002;23:416–420
60. Blake W.: Physical and biological effects of magnets. W: Jain B. [red.]. *The Art of Magnetic Healing*. Indian Gyan Home Publication, New Dehli 2004
61. Liboff A.R., Thomas J.R., Schrot J. Magnetically induced behaviour modification in rats. *Bioelectromagnetics*, 1999;22:69–75
62. Phillips J.L., RutledgeL., Winters W.D.: *In vitro* exposure to electromagnetic fields changes in tumoral cell properties. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1986;49:463–469
63. Chan C.Y., Nicholson C.: Modulation by applied electric field of purkinie and stellate cell activity to the isolated turtle cerebellum. *J. Physiol.*, 1986;371:89–114
64. Goodman R., Henderson S.A.: Sine waves enhance cellular transcriptions. *Bioelectromagnetics*, 1986;7:23–30
65. Shober A., Yark M., Fisher G.: Electrolyte change in the white mice under the influence of a weak magnetic field. *Zbl. Bakteriolog. Hyg.*, 1982;B176:305–315
66. Odintsov Y.N.: The effect of magnetic field on the nature resistance of white mice to *Listeria* infection. *Tr. Tomsk. Vaksyn. Syvarotok*, 1963;16:234–238
67. Durney C.H.: Electromagnetic dosimetry for models of human and animals. A review of theoretical and numerical methods. *Proc. IEEE*, 1980;68:33–39
68. Guy A.: Effects of long-term low-level radiofrequency radiation exposure in rats [cytowany 14 grudnia 2006]. USAF Texas Brook Air Force Base School of Aerospace Medicine. Medical Report USAFSAM-TR 1985; 85:12–28. United States Air Force Fort, Sam Houston (Texas). Adres: <http://www.sambrooks.af.mil.com>
69. Saunder R.D., Kowalczyk C.J., Sienkiewicz Z.J.: Biological effects of exposure to non-ionizing electromagnetic field and radiation [raport NRPB-240]. Proceedings of III Seminar NRPB; 24–25 marca 2003; Chilton. National Radiological Protection Board, Chilton 2003
70. Huang A.T.F., Mold N.G.: Immunological and haematopoietic alternation by 2450 MHz electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics*, 1980;1:77–87
71. Prausnitz S., Susskind C.: Effect of chronic microwave irradiation on mice *IRE Trans. Bio-Med. Electron.*, 1962;9:104–108
72. Heynick L.N., Johnston S.A., Mason P.: Radio frequency electromagnetic field cancer, mutagenesis and genotoxicity. *Bioelectromagnetics*, 2003;Sup. 6:S74–S100
73. Lai H., Singh N.P.: Single and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1996;69:513–521