

Małgorzata Rochalska

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA FLORĘ I FAUNĘ

THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON FLORA AND FAUNA

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa
Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Rolnictwa i Biologii

STRESZCZENIE

Praca przedstawia wpływ naturalnego i sztucznego pola elektromagnetycznego na florę i faunę, mechanizmy detekcji pola magnetycznego Ziemi oraz wykorzystanie tej umiejętności przez zwierzęta migrujące w celu bezbłędnie dotarcia do celu podróży. Omówiony został korzystny wpływ pól elektrycznych i magnetycznych na rośliny, dotyczący ich fizjologii, plonowania i zdrowotności. Przedstawiono także wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy zwierzęce, w tym możliwe uszkodzenia i naprawę DNA, wpływ na owady społeczne oraz wpływ pól magnetycznych wysokiej częstotliwości na gniazdowanie ptaków. Med. Pr. 2009;60(1):43–50

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, fauna, flora, zmysł magnetyczny, magnetoorientacja

ABSTRACT

This paper presents the influence of natural and artificial electromagnetic fields (EMF) on fauna and flora. The mechanisms of Earth's magnetic field detection and the use of this skill by migratory animals to faultlessly reach the destination of their travel are discussed, as well as the positive effects of electric and magnetic fields on plants relative to their physiology, yielding and health. EMF influence on social insects and animal organisms, including possible DNA damages and DNA repair systems, is presented. The influence of high frequency electromagnetic fields on birds nesting is also discussed. Med Pr 2009;60(1):43–50

Key words: magnetic field, fauna, flora, magnetic sense, magnetoorientation

Adres autorów: Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Fizjologii Roślin
Wydział Rolnictwa i Biologii, Nowoursynowska 159, 02-686 Warszawa, e-mail: małgorzata_rochalska@sggw.pl
Nadesłano: 6 stycznia 2009
Zatwierdzono: 8 stycznia 2009

WSTĘP

Wszystkie organizmy żywe, które żyły, żyją i będą żyły na Ziemi ewoluowały w naturalnym polu elektromagnetycznym (PEM) naszej planety. Przystosowały się do niego, a nawet nauczyły się wykorzystywać je do swoich celów.

Naturalne pole elektromagnetyczne Ziemi to głównie pole stałe. Pole elektryczne Ziemi wynika z różnicy potencjałów między powierzchnią planety a jonosferą i ma wartość 100–150 V/m podczas pięknej pogody. Pod chmurami, podczas silnych burz napięcie pola wzrasta nawet do 26 kV/m. Wartość naturalnego pola magnetycznego zależy od szerokości geograficznej i wynosi od 0 μ T na biegunie magnetycznym do 67 μ T na równiku magnetycznym. Ziemskie pole magnetyczne ulega silnym zakłóceniom przez strumienie cząstek emitowane przez słońce. Powstają wtedy tzw. burze magnetyczne, czasami tak gwałtowne, że mogą zaburzać działanie urządzeń technicznych. Najbliższa nam gwiazda, słońce, jest źródłem naturalnych, zmiennych pól elektrycznych i magnetycznych. Mają one częstotliwość od 500 MHz do 10 GHz, a natężenie ich składowej magnetycznej wynosi od 0,03 μ T w okresie spokojnego słońca do 0,5 μ T podczas burz magnetycznych (1).

Odizolowanie roślin i zwierząt od naturalnego PEM wywołuje niekorzystne objawy. Nasiona nie kiełkują, rośliny przestają rosnąć, a ich tropizmy ulegają zaburzeniu. Zwierzęta tracą apetyt, linieją, wykazują objawy chwiejności wegetatywnego układu nerwowego oraz nerwic. Obserwuje się także zmiany histologiczne tkanek (2).

O wpływie PEM na rośliny świadczy to, że wykazują one magnetotropizm. Wzrost korzeni, pędów czy łagiewek kiełkujących ziaren pyłku różni się w zależności od ich ułożenia względem linii sił pola magnetycznego. Najkorzystniejsze jest ułożenie nasion zgodnie z liniami sił pola magnetycznego tak, aby zarodki skierowane były ku północnemu biegunowi magnetycznemu Ziemi. Rośliny rozpoznają właściwy kierunek ruchu przy pomocy znajdujących się w ich komórkach amyloplastów. Pole magnetyczne oddziałując na te cząsteczki, ukierunkowuje wydłużające się części roślin, a o spowolnieniu lub przyspieszeniu wzrostu decydują zmiany stężenia hormonów roślinnych, które jako substancje obdarzone ładunkiem także są wrażliwe na działanie PEM (3).

Nawet niewielkie zmiany natężenia naturalnego PEM mogą wywoływać zauważalne zmiany

w przyrodzie. Gwałtowny, „wybuchowy”, rozwój wegetacji wiosną, szczególnie dobrze widoczny w górach, tłumaczony jest zmianą natężenia pola elektrycznego, które właśnie wiosną jest najwyższe i wynosi 122 V/m. Latem spada do 75 V/m. Może to bezpośrednio stymulować kiełkowanie nasion i wzrost roślin lub działać pośrednio, poprzez zwiększoną produkcję tlenków azotu w atmosferze, które wymywane przez deszcz trafiają do gleby w postaci azotanów, wzbogacając glebę w ten pierwiastek. Sprzyja to bujniejszej wegetacji roślin (4).

Także zwierzęta wyczuwają pole elektryczne i magnetyczne. Rekiny i raje reagują na nawet tak niewielkie zmiany pola elektrycznego, jak 1 $\mu\text{V/m}$, ale dzieje się tak tylko w przypadku bardzo niskich częstotliwości, wynoszących kilka Hz (5).

Niektóre ryby — takie jak mruk trąbonos (*Gnathonemus petersii*) i inne mrukowate (*Mormyridae*), sum elektryczny (*Malapterus electricus*), skaber (*Urano-scopus scaber*) czy drętowate (*Torpedinoidei*) — używają narządów elektrycznych nie tylko jako swego „radaru” pozwalającego orientować się w środowisku i zlokalizować potencjalną ofiarę, ale także jako skutecznej broni. Celuje w tym amazoński węgorz elektryczny (*Electrophorus electricus*) wytwarzający impulsowe wyładowania elektryczne o napięciu 550 V, zdolne zabić konia (6).

Zwierzęta potrafią wykorzystywać pole magnetyczne Ziemi jako wskaźnik kierunku przemieszczania. Dotyczy to przede wszystkim zwierząt migrujących, takich jak:

- mikroorganizmy (bakterie) (7),
- pierwotniaki (orzęski) (7),
- owady (motyle monarsze, pszczoły, osy, mrówki) (8,9),
- mięczaki (10),
- ryby (łososie, karpie, pstrągi, węgorze, makrele, śledzie, okonie) (10–12),
- gady (żółwie zielone, żółwie kareta, tory, być może krokodyle) (7,10,13–15),
- ptaki,
- ssaki (nietoperze, delfiny, humbaki, ślepce) (16–18).

Jedne z wymienionych organizmów przemieszczają się na odległości dziesiątków tysięcy kilometrów, inne zaledwie kilkuset metrów, ale dla wszystkich z nich są to dalekie wyprawy i wszystkie pragną bezbłędnie dotrzeć do celu. Uważa się, że różne gatunki, a nawet poszczególne osobniki tego samego gatunku w różnych sytuacjach stosują odmienne sposoby nawigacji. Zmiany pola magnetycznego Ziemi rozpoznawane są:

- Mechanicznie — poprzez spowodowane przez ziemskie pola magnetyczne zmiany położenia magnetosomów, specyficznych cząstek (prawdopodobnie kryształów magnetytu). U kręgowców znajdują się one w komórkach mózgu i indukują impulsy nerwowe związane ze zmianami natężenia pola magnetycznego informując migrujące zwierzę o jego pozycji geograficznej. U ptaków magnetosomy znaleziono w pobliżu nerwów węchowych, ale zmysł magnetyczny nie jest związany z węchem, ponieważ po przecięciu nerwów węchowych nie zanika. Bakterie i inne organizmy jednokomórkowe mają magnetosomy zawieszony w cytoplazmie (19,20).
- Chemicznie — w organizmach zwierząt znajdują się specyficzne białka (flawoproteidy) — kryptochromy, podobne w budowie do fotoliaz, detektory UV i światła niebieskiego. Kryptochromy zawierają dwunukleotyd flawinoadeninowy (FAD) ulegający reakcji utleniania i redukcji. Podczas tej reakcji tworzą się, długożyciowe pary rodników. Rodniki mogą występować w dwóch stanach spinowych: singletowym i tripletowym. Przejście od jednego stanu spinowego do drugiego indukuje impuls nerwowy docierający do mózgu i pozwalający ptakowi orientować się w przestrzeni (21). Pole magnetyczne Ziemi wpływa na częstość zmiany stanów spinowych rodników, pozwalając ptakom migrującym ustalać swoją pozycję względem sił pola magnetycznego i przemieszczać się we właściwym kierunku (22). Pole magnetyczne wpływa na równowagę reakcji tworzenia barwników. Barwniki te znajdujące się w narządach wzrokowych pozwalają, dzięki rozjaśnieniom niektórych barw, na określenie wektora pola magnetycznego (23–25). Geny warunkujące syntezę kryptochromów, a nawet same białka, znaleziono u wielu gatunków roślin i zwierząt. W procesie ewolucji w budowie kryptochromów zaszły jedynie niewielkie zmiany. Ich obecność i podobieństwo budowy u wszystkich organizmów sugeruje, że wszystkie organizmy mogą wyczuwać PEM. U większości zmysł ten jest „uśpiiony” lub niewycwiczony (26).

Zmysł magnetyczny zwierząt jest bardzo czuły. Pszczoły wyczuwają stałe pole magnetyczne o indukcji zaledwie 26 nT. W przypadku zmiennego pola detekcja jest mniej czuła i wynosi 100 μT (8).

Zewnętrzne pola magnetyczne (np. 25 μT) niskiej częstotliwości zaburzają zmysł magnetyczny zwierząt. Z kolei pole elektryczne (stałe i przemienne) oraz PEM wysokiej częstotliwości (np. radar) nie wpływają na tę cechę (27).

Organizmy żywe, przystosowane ewolucyjnie do życia w naturalnym PEM, podlegają obecnie coraz szerszym wpływom zmiennych PEM różnych częstotliwości i natężenia stworzonych sztucznie przez człowieka, do których nie są dostosowane. Liczba urządzeń emitujących różnorodne PEM rośnie niemal z dnia na dzień. W Polsce energetyczne linie przesyłowe wytwarzające PEM o częstotliwości 50 Hz mają obecnie długość ponad 12,5 tysiąca kilometrów. W niektórych rejonach (np. centralne dzielnice wielkich miast) natężenie PEM jest tak wysokie, że mówi się o „smogu elektromagnetycznym”.

Lawinowy wzrost sztucznych pól elektromagnetycznych spowodował, że mechanizmy przystosowawcze, ukształtowane procesie ewolucji, przestały być efektywne i zaczęto obserwować negatywny wpływ sztucznych PEM na organizmy żywe. Problem szkodliwości pól elektromagnetycznych (szczególnie emitowanych przez telefony komórkowe, stacje bazowe telefonii komórkowej i energetyczne linie przesyłowe) przedstawiany jest w mediach i dyskutowany na forach internetowych. Często, celem przyciągnięcia uwagi jak najszerszego kręgu odbiorców, w tonie alarmistycznym podaje się informacje mające niewiele wspólnego z rzetelną wiedzą i znajomością tematu. Zdarzają się także publikacje bagatelizujące wpływ omawianych czynników na środowisko.

Pola elektromagnetyczne wpływają na organizmy żywe niezależnie od dozy promieniowania. Wpływ ten uważany jest za nieszkodliwy dopóki jego skutki mieszczą się w granicach wyznaczanych przez zdolności adaptacyjne, kompensacyjne i regeneracyjne organizmu. Po przekroczeniu granic tolerancji fizjologicznej organizmu efekty oddziaływania zaczynają być szkodliwe.

Wpływ pól elektromagnetycznych polega na przekazywaniu energii obiektom, na które one oddziałują. W przypadku pól wysokiej częstotliwości wiąże się to z podniesieniem temperatury obiektu (efekty termiczne). Energia pól niskiej częstotliwości nie jest dostateczna, aby podnieść temperaturę obiektu, więc wywołują one efekty nietermiczne. Dla PEM wysokiej częstotliwości wielkością charakterystyczną jest SAR (specific absorption rate — tempo pochłaniania właściwego), mierzone w W/kg. Wartość SAR jest zależna od częstotliwości PEM.

Pola elektromagnetyczne mają odmienny wpływ na organizmy roślinne i zwierzęce. Na zwierzęta i człowieka mogą działać bezpośrednio oraz poprzez środowisko ich życia, np. żywność.

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ROŚLINY

Stałe i przemienne pole elektryczne wpływa korzystnie na nasiona. Kiełkują one szybciej, tworząc żywotniejsze i zdrowsze siewki, szybciej rosnące i dające lepsze plony rośliny. Rośliny wielu gatunków, rosnące przez całe życie w polu o częstotliwości sieciowej 50 Hz mają lepiej rozwinięty system korzeniowy, większą powierzchnię asymilacyjną liści i zawartość suchej masy. Umożliwia to lepsze pobieranie wody i substancji odżywczych z gleby i zwiększenie wydajności fotosyntezy, a w efekcie lepsze plonowanie (28).

Efekty działania pola elektrycznego są najlepiej widoczne w niekorzystnych warunkach środowiska (susza, niewłaściwy skład gleby czy nieprawidłowe nawożenie). Korzystny wpływ pola elektrycznego utrzymuje się przez kilka pokoleń, stopniowo słabnąc. Korzystny wpływ mają pola o niewielkim natężeniu (100–600 kV/m) i krótkim czasie działania (kilkanaście–kilkadziesiąt sekund), a nawet o bardzo niskim natężeniu (np. 312 V/m do 30 min).

Pole elektryczne wpływa na zmianę tempa wzrostu poszczególnych części i całych roślin poprzez zmianę stężenia hormonów (cząsteczek obdarzonych ładunkiem elektrycznym). Do wywołania efektu wystarczają nawet niewielkie zmiany stężenia hormonów (10^{-11} – 10^{-10} mola) (29).

Silniejsze pole elektryczne nie wpływa na wzrost i plonowanie roślin, a bardzo wysokie (np. 287,5 V/m), szczególnie przy długotrwałym działaniu (kilkanaście–kilkadziesiąt sekund) osłabia rośliny, które gorzej rosną, mniej się krzewią i gorzej plonują. Pole o natężeniu przekraczającym 20 kV/m, powodując nadmierne parowanie, uszkadza szczytowe części roślin, co wywołuje wizualny efekt zwany „opaleniem” (30).

Stałe pole magnetyczne o niewielkiej indukcji korzystnie wpływa na kiełkowanie, wzrost i plonowanie wielu gatunków roślin rolniczych, warzywnych, a także drzew i krzewów owocowych. Rośliny mają wyższą zawartość chlorofilu i kwasów nukleinowych, większą powierzchnię asymilacyjną liści, zawartość suchej masy, liczbę organów generatywnych, liczbę i masę nasion. Zwiększa się odporność na stresy środowiskowe (szczególnie niedobór wody w glebie) i choroby. Nie stwierdzono występowania roślin dotkniętych anomaliami (31).

Pole magnetyczne działa ochronnie, zmniejszając lub znosząc letalne efekty działania mutagenów fizycznych i chemicznych oraz wysokiej temperatury. Efekt ten może wynikać ze stymulujących zdolności

tego czynnika. Dobroczynne działanie wykazuje także woda „namagnesowana” przez przepuszczenie między biegunami magnesu. Podlewane nią rośliny dawały lepsze plony z jednoczesnym skróceniem okresu wegetacji oraz wykazywały zmniejszone zapotrzebowanie na wodę. Nawet silne, stałe pola magnetyczne (o indukcji ponad 10 T) nie powodują niekorzystnych skutków, chociaż ich energia jest wystarczająca do wywołania zmian struktur komórkowych (32). Pole o indukcji 14–21 T w ciągu kilku godzin działania wywołuje zmiany genetyczne rzodkiewnika (*Arabidopsis thaliana*), polegające na obniżeniu ekspresji genów ponad 2,5-krotnie w stosunku do kontroli. Pole magnetyczne miało wpływ na ekspresję 114 z 8000 zbadanych genów tej rośliny. Były to geny związane z odpowiedzią na stres środowiskowy, transport jonów nieorganicznych, biosyntezą składników ścian komórkowych oraz czynników transkrypcji (33).

Przemienne pole magnetyczne niskiej częstotliwości ma energię zbyt niską, aby podnieść temperaturę obiektu, na który działa, więc nie wywołuje efektów termicznych. Doprowadza jedynie do efektów nietermicznych, których mechanizm działania nie został dotychczas w pełni poznany. Większość prowadzonych badań dotyczyła pól o częstotliwościach sieciowych (50 i 60 Hz) z powodu ich rozpowszechnienia w środowisku. Badano także wpływ na obiekty biologiczne pola o niższych i wyższych częstotliwościach. Zboża rosnące przez cały czas w pobliżu przesyłowych linii energetycznych wysokiego napięcia, w polu o indukcji zaledwie 2,56 μ T, wytwarzały większą liczbę kłosów zawierających więcej ziarniaków. Skutkowało to wzrostem plonu o 128% w przypadku pszenicy i 83% pszenżyta, i to w trudnych warunkach środowiskowych — badane zboża rosły na ugorze bez intensywnych zabiegów agrotechnicznych (dane własne — niepublikowane). Zmienne pole magnetyczne niskiej częstotliwości korzystnie wpływa na kiełkowanie nasion, wzrost, rozwój, metabolizm, produktywność i plonowanie roślin. Ich plon jest wyższy, wykazuje lepszą jakość i walory technologiczne. Przemienne pole magnetyczne działa odmiennie na poszczególne gatunki roślin, np. najsilniej wpływa na szybkość kiełkowania ziarniaków pszenicy pole o indukcji 1,5 mT i 5 mT.

Podobnie jak stałe pole magnetyczne, pole przemienne wykazuje efekt ochronny wobec niekorzystnych czynników środowiskowych, takich jak wysoka temperatura czy mutageny. Efekty te są najlepiej widoczne w przypadku nasion o obniżonych parametrach jakościowych (starych lub uszkodzonych).

Może to być spowodowane uaktywnieniem procesów naprawczych aparatu genetycznego oraz stymulacją aktywności inhibitorów wolnych rodników. Pola magnetyczne wyższej częstotliwości nie wykazywały takich właściwości (34).

Słabe, przemienne pole magnetyczne niskiej częstotliwości (do 300 Hz) wywołuje w roślinach efekty nietermiczne. Stymulujący wpływ pola magnetycznego jest znacznie silniejszy niż pola elektrycznego przy znacznie niższych energiach. Najbardziej zbadane pole o częstotliwości 50 Hz wpływa na wiele reakcji enzymatycznych i może powodować wystąpienie komórkowej odpowiedzi stresowej. Wpływ ten jest (szczególnie w przypadku syntezy białka) bardzo podobny do szoku cieplnego wywołanego działaniem wysokiej temperatury, ale energia potrzebna do jego wywołania jest w przypadku PEM o wiele rzędów wielkości mniejsza. Słabe pole magnetyczne stymuluje u roślin wzrost i intensywność fotosyntezy, a silne pole wpływa negatywnie na początkowe fazy kiełkowania nasion i wzrostu roślin. Opóźnienia te zostają „nadrobione” w późniejszym okresie wegetacji.

Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości (o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych) wywołuje głównie efekty termiczne, chociaż obserwowane są również efekty niespowodowane podwyższeniem temperatury obiektu. Ponieważ pola, zwłaszcza o częstotliwości 300 MHz–300 GHz, wpływają na cząsteczki wody, rezultat ich działania zależy od stopnia uwodnienia obiektu. Długotrwała ekspozycja może spowodować niekorzystne efekty w postaci odparowania, a nawet wrzenia wody w całej objętości organizmu. Energia PEM wysokiej częstotliwości jest dostatecznie wysoka, aby zmieniać słabe wiązania chemiczne i np. spowodować zmianę budowy centrów aktywnych enzymów, co może z kolei prowadzić do zmian ich specyficzności, szybkości reakcji, a w efekcie zmian całych cykli metabolicznych (35).

Odpowiednie (krótkotrwałe) stosowanie PEM wysokiej częstotliwości zwiększa zdrowotność nasion, bulw i cebul, zabijając znajdujące się na nich bakterie i grzyby, bez obniżenia zdolności kiełkowania i wzrostu rośliny, a nawet z ich stymulacją. Przyczynia się ono także do eliminacji nasion twardych i ma korzystny wpływ na mikroorganizmy symbiotyczne korzeni drzew.

Dłuższe działanie PEM wysokiej częstotliwości na rośliny powoduje efekty niekorzystne — zwiększa liczbę nasion martwych oraz wywołuje zmiany w budowie kielków i siewek wyrosłych z nasion poddanych działaniu pola (36).

WPŁYW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ZWIERZĘTA

Zwierzęta reagują na PEM odmiennie niż rośliny. Zewnętrzne pole elektryczne może wpływać na pracę serca i przewodzenie nerwowe. Zmiany te obserwowane są przy działaniu silnych pól — o indukcji powyżej 1 T. Nie ustalono dotychczas jednoznacznie ani wartości progowych pól, przy których pojawiają się efekty biologiczne, ani bezpiecznych dawek pola (37).

Pole elektryczne o natężeniu 30–100 kV/m nie wywołuje u badanych zwierząt zmian fizjologicznych w zakresie składu krwi, poziomu hormonów, masy ciała, zmian histopatologicznych tkanek i narządów, nie wpływa na zapadalności na choroby, nie skraca czasu trwania życia i nie też zwiększa śmiertelności, nawet przy długotrwałym działaniu (38).

Zmienne pole elektryczne o częstotliwościach sieciowych i napięciu 4–10 kV/m zmienia zachowanie owadów latających — małe owady mają trudności z laniem, a duże starannie unikają miejsc o podwyższonym natężeniu pola. Pod wpływem pola elektrycznego zmienia się też ich aktywność życiowa, np. liczba ofiar atakowanych przez komary czy liczba kwiatów odwiedanych w ciągu dnia przez pszczoły. Nie stwierdzono natomiast wpływu pola na owady nielatające (39).

Z przyczyn oczywistych najwięcej badań dotyczy pszczół. W polu elektrycznym energetycznych linii przesyłowych już przy 1,4 kV/m owady stają się agresywne i nadaktywne, co wskazuje na stymulację ich układu nerwowego. Powyżej 4 kV/m produkują mniej miodu, a w ulu obserwuje się zwiększoną śmiertelność. Powyżej 7 kV/m w odpowiedzi na stres nadal wzrasta aktywność motoryczna owadów, spada produkcja miodu, zmieniają się obyczaje społeczne i płodność królowej. Doświadczenia wskazują, że pszczoły są bezpieczne w polu o natężeniu do 1 kV/m, zatem należy zachować odpowiednią odległość między pasieką a energetyczną linią przesyłową (np. w przypadku linii o napięciu 440 kV jest to 150 m). Podobna sytuacja, chociaż dane doświadczalne są nieliczne, dotyczy innych gatunków owadów społecznych, np. mrówek (40).

Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości, emitowane przez urządzenia techniczne, mogą zaburzać nawigację i orientację przestrzenną owadów latających, w tym pszczół (41).

Stałe pole magnetyczne może indukować w znajdujących się w jego zasięgu organizmach przepływ prądu elektrycznego. Pola o indukcji mniejszej niż 1,5 T nie wywołują zmian fizjologicznych i zachowań społecznych zwierząt, jednak przy długotrwałej ekspozycji

(ponad 30 dni) wpływają negatywnie na rozrodczość zwierząt doświadczalnych, zmniejszając liczbę gamet produkowanych przez osobniki obu płci. Na szczęście jest to efekt odwracalny i po miesiącu od zaprzestania ekspozycji rozrodczość wraca do normy (42).

Im silniejsze pole, tym wyraźniejszy wywołany przez nie efekt biologiczny. Pole o indukcji 2–5 T powoduje zmiany w pracy mięśnia sercowego (widoczne w obrazie EKG), a powyżej 7 T rozpoczynają się zaburzenia rozwoju zapłodnionych jaj wielu gatunków zwierząt wraz ze zmianą proporcji płci urodzonego potomstwa (43).

Nawet pola o wysokich wartościach indukcji nie wywołują efektów letalnych, zmian syntezy DNA i nie wpływają na strukturę chromosomów. Zmiany fizjologiczne powodowane przez stałe i impulsowe pole magnetyczne są efektem zmian struktury i stabilności błon komórkowych, i mogą skutkować (poprzez kaskadę zdarzeń) aktywacją transkrypcji DNA. Pole może też bezpośrednio wpływać na aktywność białek enzymatycznych. Zmiany w błonach komórkowych powodują zwiększony wpływ jonów, w tym jonów wapnia. Jest to reakcja podobna do odpowiedzi na stres. Zmiany homeostazy jonów wapnia mogą powodować uszkodzenia komórek.

W odniesieniu do przemiennego pola magnetycznego o niskiej częstotliwości, podobnie jak w przypadku pola elektrycznego, istnieją prace mówiące zarówno o braku szkodliwości, a nawet efektach dobroczynnych, jak i o ich szkodliwym wpływie na organizmy żywe. Wyniki niektórych badań wskazują, że pole o indukcji do 10 mT nawet przy wielomiesięcznej ekspozycji nie powoduje skutków genotoksycznych, mutagennych czy karcinogennych. Nie wpływa ono także na rozrodczość zwierząt doświadczalnych (44). Z kolei autorzy innych prac dowodzą, że pole o indukcji 5,6 mT, działające przez 3 godziny dziennie, powoduje pęknięcia pojedynczych i podwójnych nici DNA. Ponieważ energia pola jest zbyt niska, aby rozerwać wiązania chemiczne cząsteczki DNA, prawdopodobnie działa ono poprzez zmniejszenie aktywności enzymów naprawy, co skutkuje gromadzeniem się pęknięć.

Jeszcze inne badania wykazały, że pojedyncze pęknięcia DNA zaczynają się pojawiać w komórkach już przy działaniu pola o indukcji 0,1 mT, a pęknięcia podwójne przy 0,5 mT (45). Pęknięcia takie mogą powodować szybsze starzenie się organizmu i rozwój chorób neurodegradacyjnych. Chociaż energia pola magnetycznego niskiej częstotliwości jest zbyt mała, aby bezpośrednio uszkodzić DNA, może ono pośrednio przyczynić się do

tworzenia związków klastogenicznych (uszkadzających DNA). Zwiększa się utlenianie lipidów błon komórkowych, a podczas tego procesu powstają reaktywne formy tlenu, które mogą uszkadzać DNA. Jeżeli systemy naprawcze nie zdołają naprawić tych uszkodzeń i nagromadzą się mutacje, może zostać zainicjowany proces powstawania zmian nowotworowych (46). Prawdopodobnie z tego powodu Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer — IARC) uznała PEM niskiej częstotliwości za czynnik przypuszczalnie onkogeny (grupa 2B). Na szczęście efekt klastogeniczny pól niskiej częstotliwości jest bardzo słaby. Pola o indukcji powyżej 11 mT powodują widoczne zewnętrznie mutacje, u muszki owocowej dotyczą one np. budowy skrzydeł (47).

Z innej strony istnieją też prace wykazujące korzystny wpływ pól elektromagnetycznych niskiej częstotliwości. Pole o częstotliwości 180–195 Hz i indukcji 120 μ T powodowało długotrwałą poprawę pamięci przestrzennej i zmniejszenie pobudliwości motorycznej zwierząt doświadczalnych (48).

Pole magnetyczne niskiej częstotliwości zaburza magnetoorientację zwierząt migrujących — zewnętrzne pole o indukcji 25 μ T całkowicie znosi magnetoorientację pszczoł i prawdopodobnie dlatego owady zdają się unikać miejsc o podwyższonych wartościach tego pola. Takich miejsc nie unikają natomiast ptaki, które chętnie siadają na przewodach energetycznych linii przesyłowych oraz budują gniazda na słupach. Wydaje się więc, że większe zagrożenie dla zdrowia i życia ptaków stanowią linie przesyłowe jako obiekty mechaniczne, z którymi się zderzają, szczególnie podczas lotów nocnych.

Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości działają na zwierzęta, podobnie jak na rośliny, głównie poprzez podniesienie temperatury ich ciała, czyli efekt termiczny. Dopóki są w stanie zniwelować go mechanizmy termoregulacyjne organizm radzi sobie ze stresem. Zmiany fizjologiczne, które mogą prowadzić do rozwoju choroby, następują w organizmie dopiero po przekroczeniu możliwości tych mechanizmów. Wobec powyższego większość efektów PEM wysokiej częstotliwości można tłumaczyć działaniem czynników stresogennych. Występują także efekty nietermiczne, których nie można tłumaczyć podwyższeniem temperatury, ale wywołujące objawy nieswoistego stresu. W wielu przypadkach trudno jednak stwierdzić, czy jest to naprawdę skutek działania PEM, czy też efekt niewielkiej hipertermii (49).

Silne pola (SAR powyżej 6,8 W/kg) skracają czas życia, negatywnie wpływają na płodność, zwiększają liczbę

wczesnych poronień oraz obniżają wagę urodzeniową potomstwa zwierząt doświadczalnych (50).

Większość badań wpływu PEM wysokiej częstotliwości na zwierzęta w ich środowisku naturalnym dotyczy ptaków. Z jednej strony, bez skrupułów, siadają one na antenach nadawczych stacji bazowych telefonii komórkowej, czyli zdają się nie odczuwać negatywnego działania mikrofal. Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości nie zakłócają także orientacji przestrzennej ptaków migrujących. Z drugiej jednak strony wyniki badań (co prawda nielicznych) wskazują, że PEM wysokiej częstotliwości wpływa na gniazdowanie ptaków. Unikają one zakładania gniazd w miejscach o wysokich wartościach PEM, a nawet porzucają niedokończone gniazda.

Tabela 1. przedstawia wpływ PEM stacji bazowych telefonii komórkowej (częstotliwość 900 MHz i 1800 MHz) na gniazdowanie bociana białego. Jak wynika z przedstawionych w niej wyników, istnieje ścisła zależność między natężeniem PEM a liczbą znoszonych jaj i piskląt odchowanych przez ptaki (51). Badania wykazują zmniejszenie nieśności, spadek liczby zapłodnionych jaj, mechanicznej odporności skorup, zmniejszenie liczby młodych w gniazdach i przedłużenie okresu rozwoju piskląt, prowadzące do zwiększenia śmiertelności ptaków w późniejszych okresach życia.

Tabela 1. Wpływ PEM stacji bazowych telefonii komórkowej (900 MHz i 1800 MHz) na gniazdowanie bociana białego (*Ciconia ciconia*)*

Table 1. The influence of electromagnetic fields (EMF) of mobile phones basal stations (900 MHz and 1800 MHz) on the nesting of white stork (*Ciconia ciconia*)*

| Odległość gniazda od anteny stacji bazowej | EMF [V/m] | Pisklęta n | Gniazda bez piskląt n (%) |
|--|-----------|------------|---------------------------|
| 200 m | 2,36 | 0,86 | 12 (40) |
| 300 m | 0,53 | 1,60 | 1 (3,3) |

* Dane w oparciu o Blake W.: Physical and biological effects of magnets. W: Jain B. [red.]. The art of magnetic healing. Indian Gyan Home Publication, New Dehli 2004.

Z kolei wyniki innych prac wskazywały, że mikrofały nie miały wpływu na gniazdowanie ptaków, a nawet powodowały zwiększenie liczby składanych jaj (52). Zagadnienie jest zatem niejednoznaczne. Każdy gatunek zwierząt, a nawet poszczególne osobniki tego samego gatunku, reaguje inaczej na działanie pól elektromagnetycznych. Zależy to od struktury genetycznej, stanu fizjologicznego i stanu zdrowia organizmu. Szczególnie wrażliwe są osobniki młode, pisklęta, ponieważ ich mózg jest słabiej chroniony z powodu cieńszych niż u osobników dorosłych kości czaszki, mają one także słabiej wykształcone mechanizmy regulacyjne organizmu (53).

Ciągłe (działające nieprzerwanie), nietermiczne działanie PEM wysokiej częstotliwości powoduje powstanie obszarów całkowicie pozbawionych obecności samców ptaków śpiewających lub par wychowujących pisklęta, czyli wpływa na całe ekosystemy. Niektóre dane wskazują, że smog elektromagnetyczny powoduje zmniejszenie liczebności kilku gatunków ptaków, nie wpływając na liczebność osobników innych gatunków (54). Zjawisko to wymaga starannego monitorowania.

Naturalne i sztuczne PEM stały się nieodłączną składową środowiska. Ich działanie na organizmy żywe — rośliny i zwierzęta — chociaż różne w zależności od natury pól i rodzaju obiektu, na który wpływają jest coraz intensywniejsze i daje czasami zaskakujące i trudne do przewidzenia skutki. Cytowane powyżej publikacje świadczą o tym, że dotychczas zrobiono wiele, aby wytłumaczyć mechanizmy i skutki działania tego czynnika na środowisko i organizmy znajdujące się w nim, ale jeszcze więcej zagadnień czeka na wyjaśnienie.

PIŚMIENNICTWO

- Szper S., Samuła J.: Ochrona odgromowa Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983, ss. 1–3
- Kuznetsov O., Hasenstein K.H.: Magnetophoretic induction of curvature in coleoptiles and hypocotyls. *J. Exp. Bot.* 1997;48:190–196
- Audus L.: Magnetotropism: A new plant growth response. *Nature* 1960;185:132–134
- Ellis H.W., Turner E.R.: The effect of electricity on plant growth. *Sci. Prog.* 1978;65:395–407
- Kalminj A.J.: The electric sense of sharks and rays. *J. Exp. Biol.* 1971;55:371–383
- Mikołuszek W.: Życie pod prądem. *Przechr. Nauki* 2008;8:28–29
- Anitei S.: Magnetism and Life. Softpedia [cytowany 9 marca 2007]. Adres: <http://news.softpedia.com/news/Earth-039-s-Magnetism-and-Life-49050.shtml>
- Etheredge J.A., Peres S.M., Taylor O.R., Jander R.: Monarch butterflies (*Danaus plexippus* L.) use a magnetic compass for navigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1999;96(24):13845–13846
- Darci S.: Social insects and Earth's magnetic field magnetite in bees and ants. *Cienc. Dia Int.* 2000;2:12–14
- Cain S.D., Boles L.C., Wang J.H., Lohman K.J.: Magnetic orientation and navigation in marine turtles, lobsters and molluscs concepts and conundrums. *Integr. Comp. Biol.* 2005;45(3):539–546
- Tesch F.W., Wendt T.L., Karlsson L.: Influence of geomagnetism and salinity on orientation of the eel *Anguilla anguilla* L., as evident from laboratory experiments. *Ecol. Freshwater Fish* 1992;1(1):52–60
- Mann S., Sparks N.H.C., Walker M.M., Kirschvink J.L.: Ultrastructure, morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon *Oncobrynchus nerka*: implications for magnetoreception. *J. Exp. Biol.* 1988;140:35–49
- Walker M.M.: Learned magnetic field discrimination in the yellowfin tuna *Thunnus albacores*. *J. Comp. Physiol. [A]* 1984;155:673–679
- Lohman K.J.: Orientation and open-sea navigation in sea turtles. *J. Exp. Biol.* 1996;199:73–81
- Lohman K.J., Cain S.K., Dodge S.A., Lohmann C.M.F.: Regional magnetic field as a navigational markers for sea turtles. *Science* 2001;294:364–366
- Walker M.M., Kirschvink J.L., Gufran A., Dictioni A.E.: Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *J. Exp. Biol* 1992;171:67–78
- Holland R.A., Kirschvink J.L., Doak T.C., Wikelski M.: Bats use magnetic substance as internal compass to help them navigate. *Sciencedaily* 2008 [cytowany 8 maj 2008] Adres: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/02/080226213443.html>
- Walker M.M., Diebel C.T., Haugh C.V., Panchurst P.M., Montgomery J.C., Green C.R.: Structure and function of vertebrate magnetic sense. *Nature* 1997;390:371–386
- Bindhi V.V.: Stochastic dynamics of magnetic nanoparticles and a mechanism of biological orientation in geomagnetic field. University of Southampton 2004 [cytowany 27 grudzień 2004]. Adres: http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0412/0412158.pdf
- Diebel C.F., Proksch R., Green C.R., Neilson P., Walker M.M.: Magnetite defines a vertebrate magnetoreception. *Nature* 2000;406:299–302
- Brocklehurst B.: Magnetic fields and radical reactions: recent developments and their role in nature. *Chem. Soc. Rev.* 2002;31:301–311
- Cintolesi F., Ritz T., Kay C.W.M., Timmel C.R., Hore P.J.: Anisotropic recombination of an immobilized photoinduced radical pair in a 50 μ T magnetic field: a model avian photomagnetoreceptors. *Chem. Phys.* 2003;294:384–399
- Wiltscho W., Moeller A., Gesson M., Noel C., Wiltscho R.: Light — dependent magnetoreception in birds. *Naturwiss* 2004;91:130–134
- Mauritsen H., Janssen-Bienhold U., Liedvogel M., Feenders G., Stalleicken R., Dirks P. i wsp.: Cryptochromes and neuronal activity markers localize in retina of migratory birds during magnetic orientation. *Curr. Biol.* 2004;14:1946–1949
- Ritz T., Adem S., Schulten K.: Model for photoreceptors based magnetoreception in birds. *Biophys. J.* 2000;78:707–718
- Solovyov J.A., Chandler D.E., Schulten K.: Magnetic field effect in *Arabidopsis thaliana* cryptochrome-1. *Biophys. J.* 2007;92:2711–2726
- Thalau P., Ritz T., Stapput K., Wiltschko W.: Magnetic compass orientation of migratory birds in presence of a 1.315 MHz oscillating field. *Naturwissenschaften* 2005;92:6–90

28. Kopeć B.: Wykorzystanie energii pola elektrycznego dla przedsięwziętej produkcji nasion. *Postępy Nauk Roln.* 1984;3:51–63
29. Soja G., Kunsch B., Gerzabek R., 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
30. 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
31. Pietruszewski S., Muszyński S., Dziwulska A.: Electromagnetic fields and electromagnetic radiation as non-invasive external stimulants for seeds. *Int. Agrophys.* 2007;21: 95–100
32. Fernandez L., Teran Z., Leon H.: The effect of magnetically treated irrigation water to quality of onion seedlings growth in zeoponics. *Cultiv. Trop.* 1996;17:55–59
33. Paul A.L., Ferl R. J., Meisel M.W.: High magnetic field induced changes of gene expression in Arabidopsis. *Bio-magn. Res. Technol.* 2006;4:7–16
34. Konarzyński K., Pietruszewski S.: Wpływ dużych dawek zmiennego pola magnetycznego na kiełkowanie nasion pszenicy twardej. *Acta Sci. Pol. Tech. Agraria* 2005;4:11–20
35. Adria A.K.: Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 2003;24:39–48
36. Nelson S.O.: RF and microwave energy for potential agricultural applications. *J. Microw. Power* 1985;28:65–70
37. Rochalska M.: Wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy żywe: rośliny, ptaki i zwierzęta. *Med. Pr.* 2007;58(1):37–48
38. Kause W.T.: Introduction to Power-frequency electric and magnetic field. *Environ. Health Persp.* 1997;101:73–81
39. Vacha M., Soupikova H.: Magnetic orientation in the mealworm beetle *Tenebrio* and the effect of light.: *J. Exp. Biol.* 2004;207:1241–1248
40. Lipiński Z.: How far should bees be located from the high voltage power lines? *J. Apic. Res.* 2006;45:240–242
41. Nova. Are mobile phones wiping out our bees [cytowany 17 kwietnia 2007]. Adres: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/magnetic.html>
42. Nakagawa M., Murroya H., Matsuda Y., Tsakamoto H.: Effects of static magnetic field on some lipids and protein metabolism processes in rabbits. *J. Trans. Med.* 1980;34: 375–384
43. Galactionova S.V., Mastykova M., Strihizorskaya A.D.: Sensitivity of mammalian tissues to prolonged effects to constant magnetic fields of high strength. *Kosm. Biol. Aviakosm. Med.* 1985;19:78–81
44. Heredia-Rojas J.A., Caballero-Hernandes D.E.: Lack on 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
45. Fairbeirn D.W., O'Neill K.L.: The effect of electromagnetic field exposure on the formation of DNA single strand breaks in human cells. *Cell Mol. Biol.* 1994;40:561–567
46. Lai H., Singh N.P.: Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1997;18:156–165
47. Mirabolghasemi G., Azaria M.: Developmental changes in *Drosophila melanogaster* following exposure to alternating electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2002;23:416–420
48. Blake W.: Physical and biological effects of magnets. W: Jain B. [red.]. *The art of magnetic healing.* Indian Gyan Home Publication, New Dehli 2004
49. Irvin W.P., Lohmann K.J.: Orientation behaviour of sea turtle hatchlings. Disruption by magnets. Department of Biology University of North Carolina at Chapel Hill [cytowany 2 grudnia 2008]. Adres: <http://www.unc.edu/depts/geomag/turtlemag.pdf>
50. Heynick L.N., Johnston S.A., Mason P.A.: Radio frequency electromagnetic fields: cancer, mutagenesis and genotoxicity. *Bioelectromagnetics* 2003; supl. 6:S74–S100
51. Balmori A.: Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagn. Biol. Med.* 2005;24:109–119
52. Mangajski T, Rejt Ł., Kubacki R., Kieliszek J., Sobiczewska E., Szmigielski S.: Ocena oddziaływania pól elektromagnetycznych (PEM) wysokiej 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, Polska. Akademia Rolnicza, Lublin 2001, ss 71–76
53. Grigoriew J.G.: The influence of electromagnetic fields from mobile phones on chicken embryo`s. *J. Strahlungs Biol.* 2003;5:541–544
54. Everaert J., Bauvens D.: Possible effects of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrow (*Passer domesticus*). *Electromagn. Biol. Med.* 2007;26:63–72