

REVIEW

UDC 614.875:616.006.6

IZLOŽENOST NISKIM ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA I PROCES KARCINOGENEZE

VERICA GARAJ-VRHOVAC

*Institut za medicinska istraživanja i
medicinu rada, Zagreb*

Primljeno 8. siječnja 1996.

Danas se u znanstvenoj literaturi i posebice u javnim medijima posvećuje sve veća pozornost mogućim učincima izlaganja električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija na zdravlje. Eksperimentalna istraživanja na razini stanica i *in vivo* istraživanja na životinjama pokazala su različite biološke učinke koji bi se mogli povezati s učincima izlaganja ljudi niskim frekvencijama. Iako točan mehanizam ovog odnosa još nije potpuno jasan, istraživanja upućuju na to da niske frekvencije možda promiču proces karcinogeneze, ali ne izgleda vjerojatno da su i začetak u pojavi karcinoma. U pedesetak epidemioloških istraživanja ispitivana je moguća povezanost izlaganja ljudi niskim frekvencijama i pojave karcinoma u dječjoj i u odrasloj dobi. Nekoliko epidemioloških ispitivanja otkrilo je moguću povezanost između pojave karcinoma u dječjoj dobi i udaljenosti od električnih konstrukcija, prijenosnih i raspodjelnih linija. Iako rezultati upućuju na povezanost izloženosti električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija i pojave raka, potrebna su daljnja istraživanja. U međuvremenu, preporuča se tzv. »oprezno izbjegavanje«
produženog izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija.

Ključne riječi:

dječja dob, epidemiološko ispitivanje, karcinom, laboratorijsko ispitivanje, neionizirajuće zračenje, odrasle populacije

Do prije stotinu godina izloženost ljudi elektromagnetskim poljima bila je ograničena samo na polja koja proizvode prirodni izvori, da bi se danas isključivo govorilo o značajnom porastu tzv. umjetnih izvora elektromagnetskih polja koja nas okružuju u životnoj i radnoj okolini.

Posebno je zanimanje za moguće učinke električnih i magnetskih polja niskih frekvencija na zdravlje, povezanih s prijenosom i razdiobom električne energije. Svi električni vodovi (dalekovodi), vodovi koji provode struju u zgradama i električni aparati povezani su s niskim frekvencijama.

Električna i magnetska polja prirodnog podrijetla prisutna su svugdje i uključuju Zemljino magnetsko polje, magnetska polja povezana s prirodnim naslagama magnetske rude (magnetita), niskofrekvencijska polja u svezi sa živčanim impulsima i električna polja koja nastaju prilikom električnog pražnjenja kada se dodirne metalni predmet ili druga osoba. Općenito, električna i magnetska polja povezana s prijenosom, raspodjelom i korištenjem električne energije veća su i u stalnom porastu u odnosu na elektromagnetska polja koja se prirodno pojavljuju.

Jakost elektromagnetskih polja koja se prirodno pojavljuju kao i električnih i magnetskih polja u blizini kućanskih aparata prikazana je na tablicama 1. i 2. Jakost električnog polja izražena jedinicom volt/metar (V/m) mijenja se upravno proporcionalno s razlikom potencijala izvora koji ga stvara i obrnuto proporcionalno s udaljenošću od izvora. U blizini izvora napona električno polje postoji neovisno o tome da li kroz njega teče električna struja.

Tablica 1. Tipične jakosti prirodnih elektromagnetskih polja
Table 1. Typical values of natural electromagnetic fields

Izvori	Frekvencijski pojas	Jakost električnog polja (V/m)	Magnetska indukcija (T*)
Lijepo vrijeme	Statičko polje	120 - 150	
Olujno vrijeme	0 do više od 10 ⁶ Hz	100 - 10000	
Mikropulsacija (Geomagnetizam)	Široki spektar (0 do više od 20 kHz)	10 ⁻² - 10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ - 10 ⁻¹³
Geomagnetizam	Statičko polje		5 x 10 ⁻⁵

* 1T = 10⁴ Gaussa

Tablica 2. Tipične jakosti električnog polja umjetnih izvora
Table 2. Typical values of man-made electric fields

Izvor	Električno polje (V/m) na udaljenosti 30 cm od izvora
Grijač za vodu	130
Električni pokrivač	250
Televizor u boji	30
Hladnjak	60
Stereo uređaj	90
Glačalo	60
Toster	40
Sušilo za kosu	40
Užarena električna žarulja	2

Magnetsko polje stvaraju električni naboji koji teku kroz vodiče i stvaraju električnu struju. Jakost magnetskog polja izražena jedinicom amper/metar (A/m) mijenja se razmjerno s jakošću struje i obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora. Učinci magnetskih polja opisuju se proporcionalnom veličinom, magnetskom indukcijom, koja se mjeri u jedinicama tesla (T) ili prije gausima (G).

Među najjačim umjetnim poljima su ona koja okružuju dalekovode visokog napona. Na razini zemlje, ispod dalekovoda, stvaraju se električna i magnetska polja iste frekvencije kao i frekvencija električne struje koju prenosi dalekovod. Svojstva ovih polja ovise o struji, o naponu i o frekvenciji generatora polja, kao i o dielektričnim i magnetskim svojstvima (vodljivost) medija kroz koji se polja šire. Da bi se izbjegli utjecaji terena, jakost polja se mjeri na visini od 0,5 m od zemlje. Magnetsko polje ispod dalekovoda ima maksimum toka sredinom trase dalekovoda ili u blizini vanjskih vodiča. Maksimum jakosti magnetskog polja određen je samo jakošću struje i geometrijom vodiča.

Zbog visoke vodljivosti tijela, mogući učinci promjenjivog električnog polja ograničavaju se na površinu tijela. Izmjenično elektromagnetsko polje inducirano u ljudskom tijelu iste je frekvencije kao vanjsko polje. Ljudsko tijelo ponaša se kao vodič prema zemlji kad osoba nosi normalno vodljive cipele. Ipak, ako osoba nosi cipele s dobrom izolacijom (guma, plastika), ima slobodni ili nestabilni potencijal. Kada je tijelo uzemljeno, može doći do izmjeničnih struja kroz tijelo prema zemlji. Kako je električno polje uvijek povezano s promjenom električnog potencijala, magnetsko se polje pojavljuje kada struja teče, tj. kada su električni naboji u kretanju. Statičko magnetsko polje oblikuje se u slučaju konstantne jakosti struje, dok se izmjenično magnetsko polje stvara u blizini sustava prijenosa izmjenične struje. Nasuprot električnom polju, magnetsko polje lakše prodire u biološke materijale i teško se zaštititi od magnetskog polja. Silnice magnetskog polja prodiru kroz ljudsko tijelo, i u slučaju izmjeničnog polja nastaje vrtložno strujanje, koje se ne provodi do zemlje kao što je slučaj s električnim poljem. Napon koji je izazvalo magnetsko polje u rasponu prosječno prenošene energije bit će 1 mV u tijelu ako gustoća izmjeničnog magnetskog toka doseže oko 0,028 mT (1, 2).

Osim dalekovoda kao najvažnijih izvora elektromagnetskih polja, postoje polja ekstremno niskih frekvencija koja obuhvaćaju elektromagnetska polja ispod 300 Hz, i gotovo da i nemaju primjene u industriji osim kod frekvencija koje se upotrebljavaju za prijenos električne energije, npr. 50 Hz i 60 Hz. Izmjenična električna struja koristi se ponajprije za prijenos električne energije. Jakost tih polja vrlo je niska i ne utječe na zdravlje, za razliku od prijenosa visokog napona kao što su sklopke i transformacijske instalacije te polja koja okružuju dalekovode visokog napona.

Opskrba električnom energijom ide preko visokonaponskih distribucijskih sustava koji rade pod različitim naponom (nekoliko desetaka kV). Taj napon se mijenja (na nekoliko stotina kV) preko transformatora da bi se omogućio prijenos električne energije kod vrlo visokog napona, čime je smanjen gubitak energije.

Visokonaponskim dalekovodima električna se energija prenosi na velike udaljenosti (kod struja do nekoliko kA). Ovi su dalekovodi uočljivi po svojim visokim nosačima koji se dižu do visine od 50 m. Dalekovodi završavaju u trafostanicama gdje se s pomoću transformatora »snizivača« napon smanjuje za dalju raspodjelu

u lokalne transformatore. Ovi transformatori opskrbljuju niskonaponsku mrežu, koja isporučuje električnu energiju potrošačima.

Potreba za električnom energijom jako se povećala posljednjih godina, usporedno s porastom broja stanovnika, ali i s potrošnjom električne energije. U kućanstvu, elektromagnetska polja stvaraju brojni izvori, uključujući obližnje visokonaponske dalekovode, primarne i sekundarne raspodjelne vodove, električne vodove u kući i električne aparate. Općenito, električna polja u stanovima su 2-3 reda veličine nižeg intenziteta nego ona u blizini visokonaponskih dalekovoda. No, ukupna izloženost elektromagnetskim poljima u blizini nekih kućanskih aparata može biti znatno veća nego izloženost poljima koja potječu oko prijenosnih vodova, jer većina ljudi provodi više vremena na maloj udaljenosti od aparata nego u blizini dalekovoda.

ISPITIVANJE MEHANIZMA DJELOVANJA

Do kasnih 1970-ih godina većina je znanstvenika vjerovala da elektromagnetska polja niskih frekvencija imaju tako nisku energiju da ne mogu imati nikakav biološki utjecaj koji bi doveo do indukcije karcinoma. No, u novije vrijeme, laboratorijska istraživanja upućuju na to da elektromagnetska polja niskih frekvencija mogu uzrokovati određene učinke u biološkim sustavima. Jesu li ti učinci na bilo koji način povezani s karcinogenezom, možda tako da potiču maligno ponašanje u stanicama čija je molekula deoksiribonukleinske kiseline (DNK) promijenjena u smislu da postaje osjetljiva na to poticanje, još nije razriješeno.

Proučavanje bioloških učinaka povezanih s elektromagnetskim poljima niskih frekvencija može se podijeliti u tri skupine:

- pokusi *in vitro*, kojima se animalne ili humane stanice izlažu niskim frekvencijama u strogo kontroliranim uvjetima
- pokusi *in vivo*, koji obuhvaćaju izlaganje živih životinja, a u nekim slučajevima i ljudi, poljima u kontroliranim uvjetima, i
- epidemiološka ispitivanja koja retrospektivno procjenjuju i izražavaju postojanje i veličinu određenih biočinaka unutar specifične skupine ljudi izloženih elektromagnetskim poljima niskih frekvencija, bilo u radnoj (profesionalnoj) ili životnoj okolini.

Pokusi in vitro

Pokusi *in vitro* mogu se podijeliti u četiri skupine:

- ◇ moduliranje (prilagođavanje) toka iona unutar stanice;
- ◇ interferencija sa sintezom DNK i transkripcijom molekule ribonukleinske kiseline (RNK);
- ◇ utjecaj imunološki posredovane citotoksičnosti u limfocitima T;
- ◇ međudjelovanje sa stanicama koje su u vezi s karcinomom.

Moduliranje toka iona unutar stanice. Većina istraživanja na ovom području usmjerena je na učinke elektromagnetskih polja niskih frekvencija na istjecanje iona kalcija iz stanice (3, 4). Tok iona kalcija kroz membranu upravlja brojnim fiziološkim procesima, kao što su kontrakcija mišića, oplodnja jajne stanice i stanična dioba.

Istraživači izvještavaju o različitim učincima električnih i magnetskih polja niskih frekvencija na homeostazu iona kalcija, ovisno o specifičnoj frekvenciji i intenzitetu zračenja. Odnos između tih učinaka i procesa karcinogeneze može se oblikovati s pomoću nekoliko pretpostavki:

- Elektromagnetsko polje niskih frekvencija utječe na homeostazu iona kalcija unutar stanice;
- Promjene u homeostazi iona kalcija uzrokuju oksidativni stres u stanici;
- Produženi oksidativni stres povezan je s karcinogenim procesima unutar stanice.

Uzročna priroda ovih mogućih povezanosti je nepouzdana. Štoviše, uzročnost ne mora postojati na razini čitavog organizma jer je karcinogeneza proces *in vivo* koji obuhvaća različite fiziološke čimbenike, imunološke odgovore, farmakokinetiku i metaboličke učinke (5).

Interferencija sa sintezom molekule DNK i transkripcijom molekule RNK. Općenito je prihvaćeno da elektromagnetska polja niskih frekvencija ne sadržavaju dovoljno energije da bi uzrokovala mutageno oštećenje molekule DNK. Zato nije vjerojatno da niske frekvencije uzrokuju stanična oštećenja koja se obično povezuju s početnim stupnjem karcinogeneze (6). No, niske frekvencije utječu na ritam sinteze molekule DNK i na mijenjanje uzroka transkripcije molekule RNK (7). Utjecaj ovih učinaka, ako uopće postoji, na čitavi organizam nejasan je.

Utjecaj imunološki posredovane citotoksičnosti u limfocitima T. Pokusi na životinjskim (psećim) i ljudskim leukocitima nisu pokazali da bi izlaganje električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija imalo veći učinak na imunološke funkcije normalnih ili specifično-imuniziranih stanica. Dokazana je korelacija između doze niske frekvencije i imunološki posredovane citotoksičnosti u limfocita T u miša izloženih električnom polju 60 Hz jakosti od 0,1 do 10 mV/m. Ovaj učinak može upućivati na mogući mehanizam gdje električno polje može inhibirati otpornost organizma na karcinogeni proces.

Međudjelovanje sa stanicama koje su u vezi s karcinomom. Istraživanja sinteze molekule DNK u leukemijskim stanicama izloženim električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija dala su proturječne rezultate (8). Neki pokusi sa stanicama karcinoma pokazali su pojačani učinak na potencijal rasta stanica, mjereno s pomoću aktivnosti ornitin dekarboksilaze, enzima nužnog za rast stanice (9). Ovi se rezultati slažu s hipotezom da elektromagnetsko polje niskih frekvencija može biti promotor karcinogeneze. Značajke agensa koji su promotori tumora uključuje reverzibilne učinke i postojanje praga intenziteta ispod kojeg se ne očituje djelovanje promotora (10).

Pokusi in vivo

Ovi se pokusi mogu podijeliti u pet skupina, ovisno o učinku na:

- ◊ odgovore ponašanja i uspješnost učenja;
- ◊ koncentracije hormona i na središnji živčani sustav;
- ◊ kemizam krvi i imunološki sustav;
- ◊ razmnožavanje, rast i razvoj i
- ◊ izazivanje raka (procesa karcinogeneze).

Odgovori ponašanja i uspješnost učenja. Nekoliko istraživača provelo je istraživanja o promjeni ponašanja životinja koje su bile izlagane električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija, ali nisu utvrdili veće učinke (11-13), za razliku od rezultata druge grupe istraživača koji su utvrdili prolazne učinke u štakora koji su bili izloženi statičkom alternirajućem (60 Hz) polju (14, 15). *Salzinger i suradnici* izvještavaju o smanjenju ritma u odgovoru ponašanja štakora na vanjske poticaje nakon prenatalnog izlaganja tijekom 20 sati na dan i postnatalnog izlaganja tijekom 10 dana električnom polju od 30 kV/m i indukciji magnetskog polja od 1G (16), a *McGivern i suradnici* upozoravaju na promjene u ponašanju štakora koji su bili izloženi *in utero* pulzirajućem magnetskom polju dva puta na dan u periodima od 15 minuta (17).

Koncentracije hormona i središnji živčani sustav. Izlaganje indukciji magnetskog polja od 1 do 1,5 G smanjuje kemijski inducirane epileptičke napadaje i analgetički učinak morfina u štakora (18). Štakori izloženi električnom polju od 64 KV/m tijekom duljeg razdoblja (od 30 i 120 dana) pokazuju pomak u fazi normalnih hormonskih promjena (19). No, nisu uočene nikakve promjene u težini organa ili tijela. Čini se da elektromagnetsko polje niskih frekvencija utječe na endokrine procese povezane s rastom stanica *in vitro*.

Potrebno je istaknuti da se utvrdio fazni pomak u pojavi norepinefrina, serotoninina i dopamina u cerebrospinalnoj tekućini za otprilike četiri sata, u štakora izloženih električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija (20). Ovakvi učinci, ako su prisutni u ljudi, mogu utjecati na psihološke poremećaje koji imaju biokemijsko podrijetlo. Pokusi s makaki majmunima izloženim elektromagnetskim poljima niskih frekvencija upućuju na sniženu razinu dopamina i serotoninina u cerebrospinalnoj tekućini koja se nakon izlaganja ne vraća na normalu (21). Ovi rezultati upućuju na to da primijenjena električna i magnetska polja niskih frekvencija mogu dugotrajno djelovati na sustav neurotransmitera koji je važan za nekoliko psihokemijskih poremećaja, tj. bolesti.

Kemizam krvi i funkcije imunološkog sustava. Nekoliko je istraživača utvrdilo da višemjesečno izlaganje električnim poljima visokog intenziteta nema učinka na broj krvnih stanica niti na titar antitijela (22-24).

Jedno od područja posebnog interesa je očita sposobnost elektromagnetskog polja niskih frekvencija da suprimira izlučivanje melatonina putem epifizne žlijezde. Neki su istraživači opazili da izlaganje niskim frekvencijama smanjuje sekreciju melatonina (25, 26), dok drugi nisu mogli potvrditi taj učinak (27). Npr. izlaganje električnom polju od 60 Hz u rasponu od 1,7 do 65 kV/m uzrokuje smanjenje

melatoninu 2-3 puta nakon početnog izlaganja, ali se razina melatoninu vraća na normalu nakon prekida izlaganja (28). Melatonin služi kao imunomodulator putem stimuliranja imunih odgovora i povezan je s karcinomom dojke i prostate (29). Epifizni melatonin je, čini se, uključen u neposrednu kontrolu stanične proliferacije preko supresije rasta transplantiranih tumora u specifičnim eksperimentalnim uvjetima (30, 31). Ovi rezultati sugeriraju ovu hipotezu: izlaganje električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija poremećuje normalni dnevni ritam sekrecije melatoninu, koji je maksimalan noću. Pravilno lučenje melatoninu suprimira rast preneoplastičnih stanica, induciranih utjecajima iz okoliša (30).

Razmnožavanje i razvoj. Postoje podaci o učincima elektromagnetskih polja niskih frekvencija na fertilitet i prenatalni razvoj. Pokusi na pilećim embrijima koji su bili izloženi pulzirajućem magnetskom polju pokazali su abnormalnosti u razvoju (32, 33). Pokušaji da se ponove takvi učinci, uključujući i međunarodno koordinirana istraživanja, većinom su bili bezuspješni. Neki istraživači smatraju da je pileći embrio neprikladan model za procjenu mogućeg učinka niskih frekvencija (34). Pokusi provedeni na hanfordskoj minijaturnoj svinji (35) i na štakorima (36) pokazali su povećanu učestalost prenatalnih nedostataka u razvoju mišića i kostiju, ali to nije opaženo u svim slučajevima.

Istraživanja ranog razvoja središnjega živčanog sustava, posebice mozga, dala su proturječna otkrića (37). Ispitivanja u ljudi izloženih niskim frekvencijama pokazala su da nema bitnih promjena u temeljnim životnim funkcijama i u raspoloženju. Zabilježeni su fini učinci na rad srca, na izazvane moždane potencijale i na vrijeme reakcije (38).

Izazivanje raka (procesa karcinogeneze). Istraživana su karcinogena svojstva električnih i magnetskih polja niskih frekvencija u pokusnih životinja. Ženke štakora izložene statičkom ili promjenljivom polju dobivale su nitrozometilureju, koja je karcinogena tvar. Registrirano je ranije pojavljivanje i veći broj tumora maternice nego kad su životinje bile izložene karcinogenu ili samo magnetskom polju (39). Slična istraživanja s drugim karcinogenim tvarima pokazala su brže pojavljivanje raka kože u miševa, iako su broj oboljelih životinja i prosječan broj tumora nakon razdoblja od 33 tjedna bili jednaki kao u kontrolnoj skupini životinja koje nisu bile izložene električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija.

Epidemiološka istraživanja

U većini epidemioloških istraživanja promatran je odnos između izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i učestalosti raka. Neki od tih podataka su objavljeni i ukratko ćemo ih prikazati (40-42).

U pregledu 53-ju epidemioloških istraživanja, samo u sedam istraživanja nema incidencije karcinoma. U čak 42 istraživanja prikazani su nejednaki omjeri brojem 1 (bez učinka, bez incidencije karcinoma), do broja 4 (četiri puta veća učestalost incidencije karcinoma u odnosu prema kontroli). Važno je da se ovi rezultati u budućnosti imaju na umu. Intervali omjera u rasponu od 1 do 4 označavaju samo općeniti odnos između testiranih varijabli. Omjeri iznad 10 pokazuju mnogo čvršći

odnos. Primjerice, radi boljeg razumijevanja omjera, epidemiološka istraživanja o odnosu pušenja i raka pluća imaju interval omjera od 20 do 30.

Prikaz pojave karcinoma u epidemiološkim istraživanjima podijelili smo na:

- ◊ pojave karcinoma u dječjoj dobi;
- ◊ habitacijsko izlaganje i pojave karcinoma u odrasloj dobi;
- ◊ istraživanja profesionalno izloženih osoba i pojave karcinoma.

Pojava karcinoma u dječjoj dobi. Nekoliko epidemioloških istraživanja bilo je usmjereno specifično na utjecaj elektromagnetskih polja na pojavu karcinoma u dječjoj dobi. *Wertheimer-Leeperova* studija iz 1979. godine prva je privukla pozornost javnosti na taj problem (43). Njihovi rezultati pokazali su slabu ali ipak pozitivnu povezanost (interval omjera 1,6-2,2) između »visokostrojne konfiguracije« domaćinstva i karcinoma u djece dobi do 18 godina u usporedbi s kontrolnom skupinom. Visokostrojna konfiguracija domaćinstva podrazumijeva: kuće smještene na udaljenosti od 40 m od faze, primarnih žica velikog opsega, kuće smještene bliže od 20 m od nizova koje čine 3-5 žica malog opsega i kuće smještene bliže od 15 m od prvih sekundarnih žica. Ova su istraživanja bila vrlo proturječna zbog posrednog izlaganja i prisutnosti nekoliko nekontroliranih varijabli koje su prisutne u životnoj okolini tzv. »zbunjivača« koji mogu utjecati na rezultate (44). Istraživanja koja je proveo *Fulton sa suradnicima* pokazala su da nema povezanosti između pojave leukemije i izlaganja magnetskom polju (45).

Tomenius je našao više električnih »konstrukcija« (npr. visokonaponske žice 6-200 kV, trafostanice, transformatori, elektrificirane željezničke pruge i podzemne željeznice) u blizini mjesta stanovanja švedske djece koja su imala karcinom mozga, nego u blizini mjesta stanovanja kontrolne skupine (46).

Skupina autora izvještava o povezanosti između dječjeg neuroblastoma i profesionalne izloženosti roditelja električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija (47). Kasnije studije nisu potvrdile ova otkrića (48,49).

Savitiz i suradnici (50) proveli su istraživanja s namjerom da usporede *Wertheimer-Leeperova* istraživanja s više uzoraka kontrolne djece nad ometajućim elementima i došli do nekih zanimljivih rezultata:

- više nego dvostruki porast rizika karcinoma u djece iz kuće s »visokonaponskom konfiguracijom« kao što je opisano u *Wertheimer-Leeperovim* kriterijima, ali
- statistički neznatčan porast u mjerenju niskih frekvencija u domaćinstvima s visokonaponskom konfiguracijom u usporedbi s drugim kućama, i
- malen, ali statistički značajan porast rizika od pojave karcinoma u dječjoj dobi u kućama s najvišim izmjerenim niskim frekvencijama.

U istraživanjima *Londona i suradnika* uspoređuje se izlaganje elektromagnetskim poljima niskih frekvencija u domovima 233-je djece oboljele od leukemije s onom u kućama kontrolne skupine djece (51). Iako u domovima s najvećim izmjerenim niskim frekvencijama postoji malo veći rizik od pojave leukemije u djetinjstvu, ova razlika nije statistički značajna. Nadalje, djeca u domovima sa srednjim izlaganjem pokazuju najniži rizik od pojave leukemije. No, ipak djeca u domaćinstvima s »visokonaponskom konfiguracijom« prema *Wertheimer-Leeperovim* kriterijima izložena su najvećem riziku od leukemije. *London i suradnici*

također su pokazali statistički značajnu međusobnu zavisnost između rizika od leukemije i prisutnosti određenih aparata u domaćinstvu (posebice crno-bijeli televizori i televizori u boji, sušila za kosu) te uporabe pesticida i pojave razdražljivosti (51).

Istraživanja koje je kompletirao Kraljevski institut u Stockholmu donosi podatke o porastu rizika za leukemiju u djece s povećanim izlaganjem elektromagnetskim poljima niskih frekvencija utvrđenim na osnovi povijesne udaljenosti kuća od 220-400 kV vodova (52). Rizik je bio utvrđen za prosječnu godišnju izloženost indukciji magnetskog polja oko 0,2 μ T, s porastom rizika kao funkcije intenziteta izlaganja. Učinak je primarno uočen za djecu koja su živjela u pojedinačnim kućama, a dijagnosticirano u sljedećih 10 godina (1975-1985) istraživanja. Nije utvrđen odnos između izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i tumora na mozgu u dječjoj dobi. Istraživači su također utvrdili viši rizik u odraslih osoba za akutnu i kroničnu mijelogenu leukemiju kod izlaganja magnetskom polju od 0,2 μ T ili jačem.

Sagan (53) je predložio tri moguća objašnjenja za rezultate epidemioloških istraživanja, odnosno između izlaganja niskim frekvencijama i karcinoma u djetinjstvu:

- Wertheimer-Leeperovi kriteriji konfiguracije žica mogu prikazivati neki nepoznati faktor rizika od pojave karcinoma u djetinjstvu, različit od niskih frekvencija.
- Neke nepoznate karakteristike niskih frekvencija različite od mjerljivog intenziteta mogu biti odgovorne za povećani rizik karcinoma u djetinjstvu.
- Istraživanja koja pokazuju povezanost između izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i karcinoma u djetinjstvu mogu promijeniti težište na neki nepoznat način.

Habitacijsko izlaganje i pojava karcinoma u odraslih osoba. Nekoliko istraživača je proučavalo odnos izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i karcinoma u odraslih osoba u njihovoj životnoj okolini između karcinoma u odraslih osoba i izlaganja niskim frekvencijama u životnoj okolini.

Wertheimer i Leeper izvještavaju o povećanom riziku od karcinoma dojke, maternice i središnjeg živčanog sustava u osoba u blizini konfiguracija za visoke električne struje (54). Njihovi su rezultati proturječni zbog nekontroliranih izvora zračenja tzv. »zbunjivača«, upitne eksperimentalne metodologije i opet značajnosti »visokonaponske električne konfiguracije« kao indeksa izlaganja niskim frekvencijama. Severson i suradnici istraživali su akutnu nelimfocitnu leukemiju (55). McDowallov rad na akutnoj mijelogenoj leukemiji (56) i istraživanja Youngsona i suradnika o hematogenoj malignosti općenito nisu potvrdila nikakvu povezanost s ambijentalnim izlaganjem niskim frekvencijama (57). Istraživanja pojave leukemije i pojave karcinoma testisa u odraslih osoba nisu otkrila nikakvu vezu s uporabom električnih pokrivača (58).

Istraživanja u profesionalno izloženih osoba i pojave karcinoma. Mogući odnos između izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i ljudskog zdravlja prvi je put spomenut sredinom 60-ih godina u izvještajima iz bivšeg SSSR-a u kojima se opisuju nejasni simptomi, uključujući osjećaj slabosti, glavobolje,

bolju, nesanicu, infekcije gornjeg dijela dišnog trakta i umor među radnicima u električnoj centrali gdje se visoki naponi pretvaraju u niže (59). Nastojanja da se ta otkrića potvrde u nekim zapadnim zemljama rezultirala su istraživanjima u području zdravstvenih učinaka elektromagnetskih polja. Kasnih 70-ih godina zanimanje javnosti proširilo se na moguće biološke učinke i zdravstvene rizike zbog izloženosti niskim frekvencijama; rezultati prvih epidemioloških ispitivanja upozorili su na odnos između blizine dalekovoda i prijenosnih vodova i određenih oblika raka. Do danas, takav je odnos ispitan u 50-ak epidemioloških istraživanja.

U pogledu 11 ispitivanja o istraživanju smrti osoba oboljelih od leukemije u svim profesionalnim izlaganjima tzv. »električnim zaposlenjima« (npr. operateri radioamateri, zavarivači, telefonski operateri i elektroinženjeri) proračunao se relativni rizik za sve leukemije. Kao što je opisano u nedavnom pregledu 17 studija o profesionalnom izlaganju, rezultati istraživanja o profesionalnom izlaganju elektromagnetskim poljima niskih frekvencija neuvjerljivi su jer nisu mjerena izlaganja i nisu utvrđeni »zbunjivači« (60). Kontrolno istraživanje koje su proveli suradnici Nacionalnog instituta za medicinu rada u Švedskoj izvještava o višem riziku od određenih oblika raka u muškaraca profesionalno izloženih magnetskim poljima (61). Izlaganja niskim frekvencijama utvrđena su na poslovima koje je 850 osoba radilo najdulje tijekom 10 godina koje su prethodile dijagnosticiranju karcinoma. Rizik od kronične limfocitne leukemije u radnika raste s povećanim izlaganjem, s relativnim rizikom kod najviših izlaganja. Utvrđena je slaba povezanost između izlaganja elektromagnetskim poljima niskih frekvencija i tumora mozga. Učestalost akutne mijeloidne leukemije nije povezana s izlaganjem niskim frekvencijama.

Prema ovim podacima u tijeku su najmanje 22 epidemiološka istraživanja u 12 zemalja koje istražuju odnos između niskih frekvencija i pojave karcinoma. Deset istraživanja se odnosi na profesionalnu izloženost, 12 istraživanja na izloženost osoba u njihovoj životnoj sredini, ali bez profesionalne izloženosti. Većina ovih projekata uzima u razmatranje istraživanja »druge generacije« zbog toga što se polja mogu neposredno mjeriti, a učinjen je i napredak u kontroli drugih izvora zračenja tzv. »zbunjivača«. Zbog toga je u svijetu predložen plan istraživanja, i to istraživanje bioučinaka, učinaka na zdravlje, procjene izlaganja i redukcije polja (62).

ZAKLJUČAK

Laboratorijski i epidemiološki rezultati upućuju na to da elektromagnetska polja niskih frekvencija mogu međusobno djelovati odnosno stvarati određene promjene u raznim biološkim sustavima pod određenim uvjetima. Mehanizmi koji uzrokuju takve promjene slabo su poznati. U sažetku ovih promjena prikazana su sljedeća opažanja:

Nije poznato da elektromagnetsko polje niskih frekvencija izaziva bilo kakva kromosomska oštećenja, prema tome ne izgleda vjerojatno da je inicijator (začetnik) karcinoma.

Pokazano je da elektromagnetsko polje niskih frekvencija izaziva porast aktivnosti ornitin dekarboksilaze. Mnogi poznati promotori karcinoma stimuliraju ornitin dekarboksilazu, ali mnoga sredstva koja povećavaju njezinu aktivnost nisu promotori karcinoma. Promjene u sintezi proteina, imunološko i hormonsko stanje i metabolička kompetencija putem cirkadijurnih promjena može pridonijeti napredovanju karcinoma uzrokovanog neovisnim događajima. U onoj mjeri u kojoj niske frekvencije mogu utjecati na takve promjene, mogu imati učinak na rast ili inhibiciju tumora.

Smanjenje melatonina je povezano s rastom karcinoma, a upravljanje melatoninom smanjuje rast karcinoma. Za elektromagnetska polja niskih frekvencija je dokazano da smanjuju razinu epifiznog melatonina u životinja.

Gore navedene tvrdnje u skladu su s hipotezom da električna i magnetska polja niskih frekvencija mogu imati ulogu u razvitku karcinoma, ali ne postoje čvrsti dokazi ili barem snažna indikacija da niske frekvencije to doista čine.

Neka epidemiološka istraživanja o izlaganju električnim i magnetskim poljima niskih frekvencija i pojavi karcinoma pokazala su slabu povezanost između izlaganja ovim poljima i karcinoma živčanog sustava i leukemije.

Iako rezultati pokazuju povezanost izloženosti i pojave karcinoma, potrebna su daljnja dodatna istraživanja koja se i provode u svijetu.

LITERATURA

1. *International Labour Organization, ILO. Occupational hazards from non-ionising electromagnetic radiation. Geneva; International Labour Office. Occupational Safety and Health Series 53, 1985.*
2. *Haufl R. Electromagnetic ELF fields. In: Suess P ed. Non-ionizing radiation protection. New York, Copenhagen WHO, 1981, European series No 10.*
3. *Blackman CF, Benane SG, Elliott DJ, House DE, Pollack MM. Importance of electromagnetic fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro: A three model analysis consistent with the frequency response up to 510 Hz. Bioelectromagnetics 1988; 9: 215-27.*
4. *Sagan L. Epidemiological and laboratory studies of power frequency electric and magnetic fields. J Am Med Assoc 1992; 268: 625-9.*
5. *Pool R. Electromagnetic fields: The biological evidence. Science 1990; 249: 1380.*
6. *Hester GL. Electric and magnetic fields. Managing an uncertain risk. Environment 1992; 34: 7-31.*
7. *Benz RD, Carsten AL, Baum JW, Kuehner AV. Mutagenicity and toxicity of 60-Hz magnetic and electric fields. In: Technical Report, Final Report to the New York State Power Lines Project. Albany, NY: Wadsworth Labs, 1987.*
8. *Cohen MM. The effects of low-level electromagnetic fields on cloning of two human cancer cells lines (colo 205 and colo 320). In: Technical Report, Final Report to the New York State Power Lines Project. Albany, NY: Wadsworth Labs, 1987.*

9. Byus CV, Pleper SE, Adey WR. The effects of low energy 60-Hz environmental electric-magnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis* 1987; 1385-9.
10. Pitot HC, Dragan YP. Facts and theories concerning the mechanisms of carcinogenesis. *FASEB J* 1991; 5: 2280-5.
11. Hjerresen DL, Kaune WT, Decker JR, Phillips RD. Effects of 60 Hz fields on avoidance behavior and activity of rats. *Bioelectromagnetics* 1980; 2: 299-312.
12. Stern S, Laties VG, Stancampiana CV, Cox C, de-Lorge JO. Behavioral detection of 60-Hz electric fields by rats. *Bioelectromagnetics*; 1983; 4: 215-47.
13. Stern S, Laties VG. 60-Hz electric field detection by female rats. *Bioelectromagnetics* 1985; 6: 99-103.
14. Thomas JR, Schrot J. Investigation of potential behavioral effects of exposure to 60-Hz electromagnetic fields. In: Technical Report, Final Report to the New York State Power Lines Project. Albany, NY: Wadsworth Labs, 1986.
15. Thomas JR, Schrot J, Liboff AR. Low intensity magnetic fields alter operant behavior in rats. *Bioelectromagnetics* 1986; 7: 349-57.
16. Salzinger K, Freimark S, McCullough M, Phillips D, Birenbaum L. Altered operant behavior of adult rats after perinatal exposure to a 60 Hz electromagnetic field. *Bioelectromagnetics* 1990; 11: 105-16.
17. McGivern RF, Sokol RZ, Adey WR. Prenatal exposure to a low-frequency electromagnetic field demasculinizes adult scent marking behavior and increases accessory organ weights in rats. *Teratology* 1990; 41: 1-8.
18. Ossenkopp KP, Cain DP. ELF low intensity magnetic fields and epilepsy. In: Technical Report, Final Report to the New York State Power Lines Project. Albany, NY: Wadsworth Labs, 1986.
19. Free MJ, Kaune WT, Phillips RD, Cheng HC. Endocrinological effects of strong 60-Hz electric fields in rats. *Bioelectromagnetics* 1981; 2: 105-21.
20. Vasquez BJ, Anderson LE, Lowery C, Adey AR. Effects of 60 Hz fields on the daily rhythms of opiate receptors. *Soc Neurosci Abstr* 1986; 11: 443.
21. Wolpaw JR, Seegal RF, Dowman RI, Satya-Murti S. Chronic effects of 60 Hz electric and magnetic fields on primate central nervous system function. In: Technical Report, Final Report to the New York State Power Lines Project. Albany, NY: Wadsworth Labs, 1987.
22. Morris JE, Phillips RD. Effects of 60-Hz electric fields on specific humoral and cellular components of the immune system. *Bioelectromagnetics* 1982; 3: 341-7.
23. Ragan HA, Buschbom RL, Pipes MJ, Phillips RD, Kaune WT. Hematologic and serum chemistry studies in rats exposed to 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1983; 4: 79-90.
24. Quinlan WJ, Petrondas D, Lebda N, Pettit S, Michaelson SM. Neuroendocrine parameters in the rat exposed to 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1985; 6: 381-9.
25. Wilson BW, Chess EK, Anderson LE. 60 Hz electric field effects on pineal melatonin rhythms: Time course for onset and recovery. *Bioelectromagnetics* 1986; 7: 239-42.
26. Lerchl LA, Honaka KO, Reiter RJ. Pineal gland «magneto-sensitivity» to static magnetic fields as a consequence of induced electrical currents (eddy currents). *J Pineal Res* 1991; 10: 109-16.
27. Severson RK. Book review of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: The Question of Cancer. *J Natl Cancer Inst* 1991; 83: 1028-9.
28. Wilson BW, Anderson LE, Hilton DK, Phillips RD. Chronic exposure to 60 Hz electric fields: Effects of pineal function in the rat. *Bioelectromagnetics* 1981; 2: 371-80.
29. Maestroni GJ, Conti A, Pierpaoli W. Pineal melatonin: Its fundamental immunoregulatory role in aging and cancer (meeting abstract). In: Interventions in Aging and Cancer. First Stromboli Conference on Aging and Cancer (NATO Advanced Research Workshop), Stromboli, Italy 1987. *Neuroimmunomodulation* 1987;12.
30. Creasey WA, Goldberg RB. Extremely low frequency electric and magnetic fields and cancer: A literature review. Philadelphia, PA: Electric Power Research Institute, 1989.

31. *Reiter RJ*. Pineal gland, cellular proliferation and neoplastic growth: An historical account. In: Gupta E, Attansio A, Reiter RD. eds. The pineal gland and cancer. Tübingen, Germany: Brain Research Promotion: 1988; 41-64.
32. *Delgado JMR, Leal J, Monteagudo JL, Garcia MG*. Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields. *J Anat* 1982; 134: 533-51.
33. *Übeda A, Leal J, Trillo MA, Jimenez MA, Delgado JMR*. Pulse shape of magnetic fields influences chick embryogenesis. *J Anat* 1983; 137: 513-36.
34. *Chernoff N, Rogers JM, Kavel R*. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric magnetic fields. *Toxicology* 1992; 74: 91-126.
35. *Sikhov MR, Rommereim DN, Beamer JL, Buschbom RL, Kaune WT, Phillips RD*. Developmental studies of Hanford miniature swine exposed to 60 Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1987; 8: 229-42.
36. *Rommereim DN, Kaune WT, Buschbom RL, Phillips RD, Sikhov MR*. Reproduction and development in rats chronologically exposed to 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1987; 8: 243-58.
37. *Hanson HA*. Lamellar bodies in Purkinje nerve cells experimentally induced by electric field. *Brain Res* 1981; 216: 187-91.
38. *Graham C*. Immunological and biochemical effects of 60-Hz electric and magnetic fields in humans. Final report. Kansas City, MO: Midwest Research Institute; 1990.
39. *Beniashvili DS, Bilanishvili VG, Menabde MS*. Low-frequency electromagnetic radiation enhances the induction of rat mammary tumors by nitrosomethylurea. *Cancer Lett* 1991; 61: 75-9.
40. *Ahlbom A*. A review of the epidemiologic literature on magnetic fields and cancer. *Scand J Work Environ Health* 1988; 14: 337-43.
41. *Brown HD, Chattopadhyay SK*. Electromagnetic-field exposure and cancer. *Cancer Biochem Biophys* 1988; 9: 295-342.
42. *Coleman M, Beral V*. A review of epidemiological studies of the health effects of living near or working with electricity generation and transmission equipment. *Int J Epidemiol* 1988; 17: 1-13.
43. *Wertheimer N, Leeper E*. Electric wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979; 109: 273-84.
44. *Adair R*. Constraints on biological effects of weak extremely-low-frequency electromagnetic fields. *Phys Review* 1991; 43: 1039-48.
45. *Fulton LP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E*. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am J Epidemiol* 1980; 111: 292-6.
46. *Tomenius L*. 50-Hz electromagnetic environments and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. *Bioelectromagnetics* 1986; 7: 191-207.
47. *Spitz MR, Johnson CC*. Neuroblastoma and parental occupation: A case-control analysis. *Am J Epidemiol* 1990; 121: 924-9.
48. *Bunin GR, Ward E, Kramer S*. Neuroblastoma and parental occupation. *Am J Epidemiol* 1990; 131: 776-80.
49. *Wilkins JR, Hundley VD*. Parental occupational exposures to electromagnetic fields and neuroblastoma in offspring. *Am J Epidemiol* 1990; 131: 995-1008.
50. *Savitz DA, Wachtel H, Barnes FA, John EM, Turdik JG*. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields. *Am J Epidemiol* 1988; 128: 21-38.
51. *London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sabel E, Cheng TC, Peters J*. Exposure to residential electric and magnetic fields and the risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol* 1991; 134: 923-37.
52. *Feychting M, Ahlbom A*. Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high voltage power lines. IMM report. Stockholm: Karolinska Institutet 1992.
53. *Sagan L*. Epidemiological and laboratory studies of power frequency electric and magnetic fields. *J Am Med Assoc* 1992; 268: 625-9.
54. *Wertheimer N, Leeper E*. Adult cancer related to electrical wires near the home. *Int J Epidemiol* 1982; 11: 345-55.

55. Severson RK, Stevens RG, Kaune WT. *et al.* Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am J Epidemiol* 1988; 128: 10-20.
56. McDowall ME. Mortality of persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br J Cancer* 1986; 53: 271-9.
57. Youngson JHAM, Calyden AD, Meyers A, Cartright RA. A case/control study of adult hematological malignancies in relation to overhead powerline. *Br J Cancer* 1991; 63: 977-98.
58. Verrault R, Weiss NS, Hollenbach KA. Use of electric blankets and testicular cancer. *Am J Epidemiol* 1990; 131: 759-62.
59. Asanova TP, Radkov AN. The health status of people working in the electric field of open 400-500 KV switching structures. *Gig Tru Prof Zabol* 1966; 10: 50-2.
60. Bates MN. Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: The epidemiologic evidence. *Environ Health Perspect* 1991; 95: 147-56.
61. Floderus B, Persson T, Stenlund C, Linder G. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors. A case-control study. Solna, Sweden: National Institute of Occupational Health 1992.
62. Bierbaum P, Peters J. Proceedings of the Scientific Workshop on the Health Effects of Electric and Magnetic Fields on Workers. Publication No 91-111. Washington, DC: US Department of Health and Human Studies 1991.

Summary

EXPOSURE TO LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS AND THE PROCESS OF CARCINOGENESIS

In the literature as well as in public media increasing attention is paid to possible health effects of exposure to low-frequency electric and magnetic fields. Experimental studies at the cellular level and mammalian studies *in vivo* have demonstrated various biological effects that are possibly associated with human exposure to low-frequency radiation. Although the exact mechanism of this relationship is not entirely clear, it has been indicated that low-frequency radiation might promote the process of carcinogenesis, although it does not seem likely to initiate it. A possible link between human low-frequency exposure and occurrence of carcinoma at child and adult age has been examined in some fifty epidemiological studies. A few studies have demonstrated a possible connection between carcinoma at child age and distance from electrical installations. Although the results point to an association between exposure to low-frequency electric and magnetic fields and cancer, further research is called for. In the meantime "cautious avoidance" of extended exposure to low-frequency electromagnetic fields is recommended.

Key terms:

adult populations, carcinoma, child age, epidemiological investigation, laboratory study, non-ionising radiation

Requests for reprints:

Dr. Verica Garaj-Vrhovac
Institut za medicinska istraživanja
i medicinu rada
Ksaverska cesta 2
10000 Zagreb