

BIOLOŠKI EFEKTI ZRAČENJA BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

*Dejan D. Krstić**, *Vera V. Marković***, *Nataša M. Nikolić***,
*Boris Dindić****, *Stojan S. Radić****, *Dejan M. Petković** i *Milan D. Marković[‡]*

Nagli razvoj bežičnih telekomunikacionih sistema i masovno korišćenje mobilnih telefona od strane svih struktura stanovništva stavlja u prvi plan pitanje rizika usled izloženosti elektromagnetnom polju pri korišćenju ovih uređaja. Mobilni telefoni, bazne stanice mobilne telefonije, radiodifuzni predajnici itd. stvaraju elektromagnetno polje visoke učestanosti čiji je biološki uticaj predmet intenzivnog istraživanja, posebno u poslednjoj deceniji. Na osnovu obimne literature u ovoj oblasti mogu se razlikovati dve osnovne grupe efekata elektromagnetnog zračenja na organizme: termički i netermički. Postojanje termičkih efekata je dokazano i u ovom radu je dat njihov iscrpni pregled. Sa druge strane, u vezi postojanja netermičkih efekata usled dugotrajne izloženosti slabom elektromagnetnom polju postoje kontradiktorna mišljenja tako da dalja istraživanja treba da daju odgovore na ova pitanja. Sagledavanje mogućih štetnih efekata visokofrekventnog elektromagnetnog zračenja veoma je značajno sa aspekta daljeg rada na usvajanju odgovarajućih standarda za maksimalno dozvoljeni nivo izloženosti stanovništva elektromagnetnom zračenju. *Acta Medica Medianae* 2004; 43(4): 55–63.

Ključne reči: *biološki efekti elektromagnetnog zračenja, specifična apsorpcija (SAR), elektromagnetni efekti zračenja, standardi zaštite od zračenja*

Fakultet zaštite na radu u Nišu*
Elektronski fakultet u Nišu**
Medicinski fakultet u Nišu***
Klinika za onkologiju Kliničkog centra u Nišu[#]

Kontakt: Dejan Krstić
Fakultet zaštite na radu
Čarnojevića 10 a
18000 Niš, Srbija i Crna Gora
Tel.: 064/1900-560,
e-mail: dejan@znrnfak.ni.ac.yu

Uvod

Eksplzivni napredak tehnologije u oblasti mobilnih komunikacija doveo je do masovnog korišćenja mobilnog telefona od strane širokih slojeva stanovništva, uključujući i najmlađu populaciju. Šira javnost nije u potpunosti upoznata sa rizicima neadekvatnog korišćenja mobilnog telefona, što se posebno odnosi na decu, trudnice, srčane bolesnike sa pejsmejkerima itd. Mobilni telefoni stvaraju elektromagnetno (EM) polje koje pod određenim uslovima može biti štetno po zdravlje ljudi. Biološki uticaj elektromagnetnog zračenja predmet je intenzivnog istraživanja brojnih naučnoistraživačkih timova u svetu, naročito u toku poslednje decenije.

Kod GSM (Global Sistem for Mobile Communication) standarda za mobilne komunikacije koji se danas široko koristi u Evropi i svetu koriste se frekvencijski opsezi oko 900 MHz i 1800 MHz, pri čemu snage predajnika mobilnih telefona nisu veće

od 2 W. Struktura GSM mobilnih sistema bazira se na postojanju niza baznih stanica, koje se postavljaju na određenom međusobnom rastojanju tako da obezbede što bolju pokrivenost signala na što većem području. Antene baznih stanica kao i antene mobilnih telefona emituju elektromagnetne talase (elektromagnetno zračenje), pri čemu je emitovana energija zračenja baznih stanica znatno veća od energije zračenja mobilnih telefona. Međutim, s obzirom da intenzitet emitovanih elektromagnetnih talasa opada sa kvadratom rastojanja od izvora, smatra se da je štetni uticaj zračenja baznih stanica manji u odnosu na mobilne telefone. Naime, rastojanje između korisnika i mobilnog telefona (bliska zona) je znatno manje u odnosu na rastojanje između korisnika i bazne stanice (daleka zona), pa je intenzitet polja na mestu korisnika (npr. glave) od mobilnog telefona znatno veći od onog koji stvara bazna stanica.

Cilj rada

Ispitivanje bioloških efekata nastalih usled uticaja elektromagnetnog zračenja na radio frekvencijama (RF) i mikrotalasnim frekvencijama (MW) je mlada naučna disciplina koja se u poslednjoj deceniji intenzivno razvija. Danas postoji veliki broj radova u naučnoj literaturi u kojima su objavljeni rezultati teorijskih i eksperimentalnih istraživanja uticaja EM polja na tkiva, organe i sisteme životinja i ljudi. Cilj ovog rada je da da pregledni opis bioloških efekata zračenja

na mikrotalasnim frekvencijama koje se koriste u mobilnim komunikacijama. Izdvajanje potvrđenih efekata i interakcionih mehanizama od onih koji su nepotvrđeni i još uvek na nivou hipoteze, može pomoći u radu stručnjaka koji multidisciplinarnim sagledavanjima ovih fenomena mogu doprineti otklanjanju ili smanjenju štetnih uticaja kao i otklanjanju štetnih posledica po zdravlje ljudi. Ovo posredno doprinosi donošenju odgovarajućih standarda u oblasti zaštite životne i radne sredine kao i podizanju javne svesti u korišćenju savremenih tehnologija.

Apsorpcija elektromagnetnog zračenja u tkivima

Da bi se potpunije shvatili mehanizmi interakcije elektromagnetnog polja i biološkog tkiva potreban je multidisciplinarni pristup koji obuhvata uključivanje stručnjaka iz oblasti elektromagnetike i medicine. Prostiranje elektromagnetskog polja kroz biološka tkiva razlikuje se od prostiranja kroz slobodni prostor te je stoga vrlo bitno poznavati veličine koje opisuju elektromagnetna svojstva tkiva. Za opisivanje elektromagnetnih osobina biološkog tkiva koristi se kompleksna dielektrična konstanta (ϵ) tkiva data kao:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 + j \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (1)$$

gde je $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}$ F/m, ϵ_r relativna dielektrična konstanta, a σ je električna provodnost tkiva, f frekvencija EM talasa i j je imaginarna jedinica.

Dubina penetracije elektromagnetnog polja, δ , je rastojanje od ivice tkiva do tačke u kojoj jačina polja opadne e puta ($e = 2.71828$) u odnosu na početnu vrednost i može se izračunati iz sledeće formule:

$$\delta = \frac{1}{\omega} \left[\left(\frac{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}{2} \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

U Tabeli 1 za različite frekvencije prikazane su vrednosti veličina koja karakterišu mišićno tkivo i odgovarajuća dubina penetracije (1)

Tabela 1. Elektromagnetni parametri i dubina penetracije za mišićno tkivo

Frekvencija (MHz)	Relativna dielektrična konstanta (ϵ_r)	El. provodnost (σ) $\left[\frac{S}{m} \right]$	Dubina penetracije δ [cm]
0.1	1850	0.56	213
1.0	411	0.59	70
10	131	0.68	13.2
100	79	0.81	7.7
1000	60	1.33	3.4
10000	42	13.3	0.27
100000	8	60	0.03

Iz formule za dubinu penetracije iz prethodne tabele vidi se da elektromagnetne osobine tkiva zavise od frekvencije. Dubina penetracije je velika na

niskim frekvencijama i rapidno opada do 1 mm i manje na frekvencijama većim od oko 10000 MHz. Međutim, dubina penetracije nije sama po sebi dovoljna da karakteriše efekte prodrlog elektromagnetnog polja jer je stvarna raspodela u tkivima složena funkcija različitih parametara (2,3)

Nakon što incidentni (upadni) talas penetrira u biološki objekat, polje utiče na različita tkiva što rezultuje u kompleksnoj raspodeli lokalnih polja. Ova unutrašnja polja zavise od više veličina kao što su: frekvencija, elektromagnetne osobine tkiva (ϵ, α, σ), geometrija i orijentacija objekta (organa-tkiva) u odnosu na pravac vektora upadnog polja, kao i da li je izloženi objekat u zoni bliskog ili dalekog polja u odnosu na izvor.

Količina apsorbovane energije i raspodela gustine energije u objektu koji je izložen dejstvu elektromagnetnog polja je funkcija jačine električnog polja E i magnetne indukcije B u samom objektu. Rezultujuća raspodela energije može biti opisana pojmom specifična apsorpcija (SAR – specific absorption rate), koja se definiše kao brzina promene količnika priraštaja energije (dW) apsorbovane po jedinici mase (dm).

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (3)$$

pri čemu $dm = \rho \cdot dV$ gde je ρ gustina u kg/m^3 a V zapremina.

SAR se može iskazati u funkciji intenziteta unutrašnjeg električnog polja E i to

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \left[\frac{W}{kg} \right], \quad (4)$$

Alternativna definicija je

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

pri čemu je c_i toplotni kapacitet tkiva u $J/kg^\circ C$, a $\frac{dT}{dt}$ predstavlja brzinu promene temperature tkiva.

Koncept SAR ima smisla samo u frekvencijskom opsegu od 100 KHz do 10 GHz, jer je u tom području dubina penetracije veća od 1 cm. Gustina indukovane struje je važan parametar na RF frekvencijama ispod 100 kHz, dok se na frekvencijama iznad 6 GHz energija apsorpuje površinski pa je važna gustina upadne snage.

Postoji opsežna literatura o proceni srednje vrednosti SAR za celo telo i prostornoj raspodeli SAR za različite modele životinja pa čak i za model čoveka. Mnoge ranije procene baziraju se na prostim sferičnim ili elipsoidnim modelima, npr. Durnijev (4). Međutim, u novijim istraživanjima koriste se numeričke simulacije anatomski korektnijih modela odraslog čoveka. Rezultati tih istraživanja pokazuju da SAR ima najveću vrednost kada je upadno električno polje (E) u ravni sa glavnom osom tela (zvanom E-polarizacija) u okolini rezonantne učestanosti ($\approx 70-80$ MHz za čoveka po ergonomskom proseku, $\approx 35-40$ MHz kada čovek stoji na provodnoj ravni, i oko 100 MHz kada je u sedećem položaju).

SAR kao veličina koja je frekvencijski zavisna maksimalnu vrednost ima na rezonantnoj frekvenciji

koja za čoveka reda veličine 100 MHz. Na rezonantnoj frekvenciji je SAR oko 0.2 W/kg za gustine upadne snage reda 10 W/m². Na višim frekvencijama SAR opada do asimptotske vrednosti koja je 5–6 puta niža od maksimalne vrednosti. Na niskim frekvencijama (10–100 MHz) SAR se menja sa kvadratom frekvencije. Na rezonantnoj frekvenciji male životinje su znatno veći apsorberi od ljudi, pa tako npr. SAR za miša na rezonantnoj frekvenciji (koja je u tom slučaju oko 2 GHz) iznosi nešto preko 1 W- za gustine upadne snage reda 10 W/m².

SAR je ključni koncept u planiranju i analizi eksperimenata, kako onih *in vivo* tako i *in vitro*, i služi kao osnova savremenim standardima za zaštitu ljudi od RF/MW zračenja. Pri tom treba istaći da podjednaku važnost imaju i prosečna vrednost za SAR za celo ljudsko telo i lokalni maksimumi prostorno usrednjene vrednosti za SAR (5)

Biološki efekti apsorpcije EM zračenja

Cilj mnogobrojnih istraživanja bioloških posledica usled izloženosti RF/MW zračenju jeste pokušaj da se napravi kompromis između potencijalno štetnog dejstva RF zračenja i koristi koju upotreba mobilnih telefona i drugih mikrotalasnih uređaja donosi ljudima. Pravo sagledavanje tog odnosa može biti samo ako se potpuno istraže svi štetni efekti i mehanizmi delovanja zračenja na ljude. Kako mnogi od eksperimenata ne mogu biti izvedeni na ljudskim subjektima, često se umesto njih za ispitivanja koriste životinjski subjekti. Većina istraživanja, koja su zabeležila biološke efekte, bazirala su se na RF/MW zračenjima (od nekoliko minuta do nekoliko sati) životinjskih subjekata ili na *in vitro* ispitivanjima. Usled velikih zahteva kako ekonomske tako i tehničke prirode, svega par studija bavilo se istraživanjem posledica dugotrajnog uticaja kontrolisanog zračenja RF/MW polja na životinjske subjekte. Većina nedavno objavljenih dugotrajnih ispitivanja, npr. Frei (6,7), Toler (8), Chou (9) i Mason (10), nisu uspeali da dokažu nikakve štetne efekte, uključujući i rak, na životinjskim subjektima koji su bili izlagani zračenju. Analiza koju je obavio Repacholi (11) ukazala je na uvećanje malignih tumora kod genetski modifikovanih miševa izloženih elektromagnetnom polju mobilnog telefona.

Još jedna od studija, koja je trebalo da pokaže da li je zračenje mobilnih telefona štetno po zdravlje, objavljena je 1997. godine (12). Posmatrana je mogućnost uvećanja raka limfnog sistema (lymphoma) kod genetski izmenjenih miševa koji su izlagani zračenju mobilnih telefona. Ukratko, posmatrane su dve grupe miševa, jedna koja je izlagana 30-minutnim zračenjima, po dva puta u toku dana tokom 18 meseci, i jedna kontrolna grupa. Pri tom je za zračenje korišćen signal pravougaonih impulsa na frekvenciji od 900 MHz; učestanost ponavljanja impulsa bila je 217 Hz, a širina impulsa 0.6 ms. Gustine upadne snage, korišćene u eksperimentu, iznosile su 2.6-13 W/m², SAR od 0.008-4.2 W/kg, a srednja vrednost SAR 0.13-1.4 W/kg. Na kraju eksperimenta, 53%

zračenih miševa imalo je pojavu tumora, prema 22% miševa iz kontrolne grupe. Takođe, kod zračenih miševa zabeležen je brži razvoj tumora. Nešto kasnije, sprovedeno je još jedno istraživanje (12) u kome je Motorola, sa ciljem da opovrgne prethodne tvrdnje, formirala sistem koji se sastojao od 15 uređaja, tzv „Farrisov točak“ (5). U svakom od uređaja bilo je 40 miševa, od kojih je svaki posebno bio stavljen u Perpleks cev (Perpleks cevi su cilindrično postavljene oko dipol antene). Cevi su napravljene sa ciljem da miševi ne mogu da promene orijentaciju u odnosu na polje. Grupe su bile podeljene prema nivou SAR: 0.25, 1.0, 2.0, 4.0 W/kg. Tako je grupa od 120 miševa sklonih raku limfnog sistema (E mu-Pim1 miševi) i 120 divljih miševa izlagano svakom od 4 SAR nivoa 1 sat dnevno, 5 dana u nedelji, u trajanju od 24 meseca. Upoređivani su rezultati grupe zračenih miševa, sa rezultatima kontrolnih grupa i pokazano je da nije zabeležen porast tumora kod miševa kao posledica dvogodišnje izloženosti radijaciji mobilnih telefona (13).

U novije vreme rađeno je preko 20 epide-mioloških ispitivanja na ljudima koji su hronično izloženi raznovrsnim izvorima RF/MW zračenja (radar, mobilni telefoni, itd). Međutim, njihovi rezultati su od ograničene koristi, jer su uočeni određeni tehnički nedostaci pri ispitivanju, a pre svega nemogućnost procene stepena izloženosti. Mnoga od ovih ispitivanja za cilj su imala da dokažu pojavu kancera usled izloženosti RF/MW polju, ali su rezultati na kraju bili ili dvosmisleni ili krajnje kontradiktorni. Na osnovu dosadašnjih saznanja u medicini postoji mišljenje da niska kvantna energija RF/MW polja ne može da započne ili ubrza kancerogeni proces, bar ne prema uslovima klasičnih fizičkih principa. U principu, proučavano je samo nekoliko frekvencija, najčešće po jedna u datom trenutku i sa ograničenim intenzitetima polja. U najgorem slučaju u razmatranje se uključuje i izloženost zračenju na rezonantnoj frekvenciji, pri čemu je najduža dimenzija tela 0,4λ i smatra se da RF/MW energija maksimalno prodire u tkivo.

Poznati (termički) efekti

Fiziološki efekti

Zagrevanje tkiva usled RF/MW zračenja bioloških organizama je značajan efekat, koji je nedvosmisleno dokazan. Mnoga od objavljenih istraživanja uzela su u obzir termoregulacione mehanizme koji kvantifikuju sposobnost organizma da reguliše temperaturu svog tela. Ova istraživanja su najpre sprovedena na laboratorijskim životinjama, a naročito na malim glodarima, npr. miševima, pacovima i hrčcima. Mali sisari su neadekvatni modeli ljudskih bića jer veliki odnos površina-zapremine tela ovih životinja zahteva proizvodnju velike količine toplote od strane organizma kako bi se održao balans temperature. Ipak, takve životinje su u nepovoljnom položaju u toplim okruženjima jer imaju manje efikasne mehanizme za gubitak toplote. Uopšteno, oslanjanje na podatke prikupljene na ljudima i na neljudskim primatima, iako nepotpune, doprinelo je znatno boljem razumevanju

kako RF/MW polja intereaguju sa biološkim sistemima, a to je znanje koje će svakako poslužiti za formiranje i postavljanje standarda o ljudskoj izloženosti.

Tako je u jednom od obimnijih ispitivanja, koje je sprovedla grupa naučnika (Hirata, Morita, Shiozawa), upotrebljen model ljudske glave kako bi se ispitalo uvećanje njene unutrašnje temperature usled delovanja elektromagnetnog polja u frekventijskom opsegu od 900 MHz do 2.45 GHz (14). Pri tom je za maksimalno uvećanje temperature glave i mozga od 10°C i 3.5°C bila potrebna maksimalna vrednost za SAR (usrednjena po 1g tkiva) od 65 W/kg, što je oko 40 puta više u poređenju sa FCC standardom. Takođe je uočeno da se isti porasti temperature u glavi i u mozgu postižu i pri maksimalnoj vrednosti za SAR (usrednjenoj za 10g tkiva) od 40 W/kg, što je 20 puta više u poređenju sa ICNIRP standardom za SAR. Ove vrednosti za maksimalne temperature opisane su standardima zaštite. Pri tom, povećanje temperature u mozgu od 3.5°C predstavlja dozvoljenu granicu koja ne dovodi do fizioloških oštećenja (15). Uočeno je i da porast temperature u hipotalamusu od 0.2°C do 0.3°C dovodi do izmene u termoregulacionom mehanizmu (16), i da termičko oštećenje kože nastaje pri porastu temperature od oko 10°C (17). Ista grupa napred pomenutih autora prethodno je pokazala da povećanje temperature u ljudskoj glavi mnogo više zavisi od frekvencije nego od izlazne snage antena u frekventijskom opsegu, koji se koristi u satelitskim komunikacijama (18, 19). U jednom drugom istraživanju Ghandhi je napravio detaljnu diskusiju porasta temperature za maksimalnu vrednost za SAR, propisanu IEEE preporukom, pri frekvencijama od 900 MHz i 1.8 GHz (20).

Obimni laboratorijski podaci prikupljeni u eksperimentima sa dve vrste majmuna (*rhesus* i *squirrel*) (21) prikazali su da će se spontana reakcija ovih životinja na povećanje i na gubitak toplote javiti kada se one podvrgnu specifičnim RF/MW zračenjima u termički kontrolisanim sredinama. Npr. usled hladnog okruženja doći će do metaboličke produkcije toplote kod toplokrvnih sisara u iznosu koji je direktno proporcionalan temperaturi ambijenta. Za vreme akutnog izlaganja celog tela RF/MW poljima, porast produkcije toplote kod toplokrvnih sisara usled hladnoće biće redukovano za iznos proporcionalan snazi polja ili SAR (Candas (22), Lotz i Saxton (23, 24), Adair (25) i Lotz (26)). Ovo prilagođavanje prouzrokuje da telo dovede unutrašnju telesnu temperaturu unutar granica za normalnu telesnu temperaturu. Uz to, mehanizmi gubitka toplote u vidu vazodilatacije i znojenja izazvani su izlaganjem toplokrvnih primata RF/MW zračenju u termički neutralnim i toplim okruženjima. U oba slučaja veličina fiziološke reakcije direktna je funkcija od vrednosti SAR za celo telo (22, 23, 24, 25, 27, 28).

Nakon proučavanja na toplokrvnim primatima krenulo se i na proučavanja uticaja zračenja RF/MW polja na ljude. Oni su bili izloženi raznovrsnim RF/MW poljima. Tako je Adair objavila veliki broj eksperimenata u ovoj oblasti (29, 30, 31, 32, 33), koji treba da pomognu u formiranju preciznih podataka o efikasnosti termoregulacije ljudskog organizma u RF/MW okruženjima. U tim eksperimentima se prati

standardni protokol prema kome su volonteri, inače odrasli ljudi, podvrgnuti zračenju samo određenih delova tela u trajanju od 45 minuta, a zatim se u narednih 30 minuta prekida zračenje kako bi se uspostavila temperaturna ravnoteža u okruženju sa kontrolisanom temperaturom. Inače, zračenja su bila na frekvencijama od 450 MHz (kontinualno zračenje) i 2450 MHz (kontinualno zračenje i impulsno zračenje) i za tri temperature sredine (24°C, 28°C i 31°C). Maksimalna vrednost lokalne gustine snage izabrana je tako da se dostigne ista lokalna maksimalna vrednost SAR na obe frekvencije. Do danas, maksimalna vrednost za koju je vršeno ispitivanje u impulsnom režimu za površinski SAR iznosi 15.4 W/kg (Adair, (29), i predstavlja gotovo dvostruko veću vrednost u odnosu na vrednost iz IEEE Standarda C95.1–1991 (34) (vrednost do koje je dozvoljeno izlaganje zračenju delova ljudskog tela na frekvenciji od 2450 MHz). U svim eksperimentima pojedinačni delovi ljudskog tela bili su izloženi intenzitetima koji su jednaki ili veći od maksimalno dozvoljenih vrednosti (MPE=Maximum Permissible Exposure) iz standarda. Uočeno je da ova zračenja izazivaju blaže termičke efekte koji prouzrokuju normalnu reakciju tela da se oslobodi viška toplote, pre svega znojenjem. Posebno treba naglasiti da ni kod jednog subjekta, bez obzira na okolnosti pod kojima su se obavljali eksperimenti, nisu uočena uvećanja unutrašnje temperature organizma. Najnoviji eksperimenti u ovoj seriji uključuju i uticaj elektromagnetnog polja na celo telo u dalekoj zoni zračenja na frekvenciji od 100 MHz. Subjekti nisu uočili osećaj topline čak ni pri snagama polja koje su i do 8 puta bile veće od dozvoljenih MPE vrednosti datih standardom IEEE C95.1–1991 (34), a ipak je zabeležena reakcija tela ispitanika u smislu gubitka toplote tela vazodilatacijom i znojenjem kako bi se u njemu postigla termička ravnoteža. Ovde treba naglasiti da se blagi subjektivni osećaj topline može registrovati u gotovo celom mikrotalasnom (MW) području, ali ovaj osećaj kao da smanjuje na nižim frekvencijama, npr. na frekvencijama od 50–100 MHz, jer tada energija penetrira u telo. Prema grubim proračunima, u ovim uslovima potencijalna srednja vrednost SAR za celo telo dostiže vrednost od oko 1 W/kg, mada je to vrednost koja tek treba da se potvrdi kroz dozimetrijsko modelovanje ljudi u sedećem položaju (što je još uvek nedostupna tehnika). U svakom slučaju, iako je dostignuto prekoračenje dozvoljenog zračenja volontera u ovim eksperimentima, dodatna toplota u telima nastala usled zračenja jednostavno je disipirana i pri tom kod ispitanika nisu uočene nelagodnosti.

Uticaj na ponašanje (Bihevioralni efekti)

Izloženost RF/MW zračenju može da dovede do promena u ponašanju ljudi i laboratorijskih životinja. Pri tom se uočavaju kako one najblaže, kao što je osećaj topline i zvuka, tako i one značajnije, kao što je agresivnost. Pored te dve ekstremne pojave uočen je i poremećaj u uobičajenom ponašanju laboratorijski testiranih životinja, pri čemu se kod istih javila uznemirenost, promena u socijalnom ponašanju (39,

40) a u izvesnim slučajevima ali ipak ređe, i smrt. Ponekad se dešavalo da životinje pobegnu i tako izbegnu RF polja, ali su se one isto tako trudile da se nađu u RF polju kada im je hladno.

Već više od decenija ispitivanja ukazuju na promene u ponašanju laboratorijski ispitivanih životinja izloženih RF polju, što je doprinelo uočavanju veoma verovatnih mehanizama interakcije organizama i polja. Ovi mehanizmi povezani su sa generisanjem toplote u tkivima, što prouzrokuje aktiviranje termičkih senzora u koži kao i u centralnom nervnom sistemu. Neke studije o termičkoj osetljivosti ljudi koja se javlja usled dejstva RF/MW polja, koje su objavili npr. Hendler (35), Justesen (36) i Blick (37), takođe utvrđuju da promene u ponašanju uočene kod životinja izloženih RF polju proizilaze iz termičkih promena. I zaista, porast površinskih i unutrašnjih telesnih temperatura često prati specifične promene u ponašanju koje su opisane u laboratorijskim uslovima (38).

Poremećaj u ishrani pri specifičnoj apsorpciji za celo telo (whole-body SAR) od ≈ 4 W/kg (de Lorge (43) je indikativan parametar biološkog efekta RF/MW zračenja (34, 44, 45, 46, 47). Ova promena u ponašanju demonstrirana je na životinjskim vrstama i u različitim uslovima izloženosti RF poljima.

Izloženost MW zračenju pobuđuje i auditivne efekte, pa tako sposobnost opažanja izvesnih impulsnih RF/MW signala predstavlja primer još jednog indikativnog efekta za ljude i za mnoge životinjske vrste. Tako je Guy (48, 49) pokazao da brojni ljudski subjekti primećuju impulsnu energiju mikrotalasnog područja na frekvenciji od 2.45 GHz u vidu pucketanja, tonova nalik zvuku voza ili zujanja. Na ovoj frekvenciji je za ljude određen prag od $40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ po impulsu, pri čemu je širina impulsa u opsegu od 1 do 32 μs . Vrednost za SAR po impulsu iznosi 16 W/kg, a dobijena je na osnovu apsorpcije za sferični model ljudske glave. Mehanizam interakcije je indukcija talasa termoelastičnog pritiska na moždano tkivo čime se aktiviraju receptori u unutrašnjem uhu (50). Usled udara svakog impulsa javlja se neznatan porast temperature, reda 10^{-5} °C. Iako ova pojava može biti iritirajuća, nije uočen rizik od oštećenja pri izloženosti nižim vrednostima ili maksimalnim vrednostima snage, koje su preporučene standardima zaštite, kao što je IEEE standard C95.1 (34).

U skorije vreme još neka istraživanja su dokazala promene u ponašanju koje nisu prouzrokovane termičkim efektima. Tako je nakon objave standarda IEEE C95.1-1991, kojima je postavljena gornja granica (100 KV/m električne komponente polja) ljudskog izlaganja kratkotrajnim MF impulsima velike maksimalne snage, D'Andrea obavio određena istraživanja na majmunima. Naime, ovi majmuni su obučavani kompleksnom zadatku koji je obuhvatao razlikovanje boja i za to vreme bili izloženi (ili je zračenje samo simulirano) uticaju dva tipa MF impulsa na frekvenciji od 5.62 GHz u trajanju od 20 minuta. Maksimalne vrednosti gustine upadne snage koje su proučavane, kretale se u opsegu od 56 do 277 W/cm² pri ponavljanju impulsa od 100Hz pri širini impulsa od 50 ns i 2.8 μs . Pri tome su dobijene vrednosti

za srednju vrednost SAR za celo telo 2, 4 ili 6 W/kg. Tokom istraživanja su uočene značajne promene u ponašanju, u vremenu reakcije, i u ishrani tokom izlaganja SAR od 4 i 6 W/kg, ali ne i pri SAR od 2W/kg. Uočeno je da su impulsi velike maksimalne snage i impulsi radara isto uticali na promene u ponašanju majmuna kao i da su se oni oporavili ubrzo po prestanku zračenja. Postoji mogućnost da su majmuni mogli da čuju impulse, ali bi osećaj oba tipa impulsa mogao biti isti. Dakle, dok je sa jedne strane, ovo istraživanje potvrdilo promene u ponašanju na ranije postavljenoj granici za SAR od 4W/kg, sa druge strane ono nije moglo dokazati jedinstvene rizike koje nastaju usled dejstva mikrotalasnog polja velike maksimalne vrednosti snage, bliske graničnoj vrednosti električnog polja navedenoj u IEEE standardu C95.1-1991.

Na osnovu nekoliko istraživanja koja su razmatrala promenu kognitivnih mogućnosti za vreme ili nakon RF/MW zračenja ne mogu se lako izvesti zaključci. Određeno smanjenje kognitivnih mogućnosti uočeno je za vrednost SAR za celo telo manju od 4W/kg, dok je poboljšanje primećeno za vrednost SAR od oko 13 W/kg. Razlike u postavljenim zadacima pred subjekte eksperimenata, korišćenje različitih sistema zračenja, primena različitih parametara modulacije, istraživanje pri različitim frekvencijama, razlike u vrstama testiranja, kao i trajanje izloženosti, sve to otežava interpretaciju i poređenje zaključaka u postojećoj literaturi.

Tako, izgleda, termičke promene prate gotovo sve primećene promene u ponašanju nastale usled apsorbovane RF energije u određenom opsegu frekvencija. Kod istraživanja, u kojima su uočene promene u ponašanju životinja za vreme izloženosti akutnom RF zračenju, istovremeno je primećeno zagrevanje tkiva, blagi termički stres kao i promena ponašanja, koja su po prirodi termoregulacionog karaktera.

Netermički efekti

Kako je u toku era široke upotrebe mobilnih telefona i drugih uređaja za ličnu komunikaciju, u poslednje vreme dosta se govori o potencijalnim rizicima usled polja niskog intenziteta zračenja, koja potiču iz ovih uređaja [Stewart (51) i Carlo (52)]. Postoji težnja da se ignorišu današnji čvrsti dokazi o termičkoj RF/MW bioefekata u korist netermičke interakcije slabih polja sa biološkim tkivima. Skorašnje kontroverzne tvrdnje u vezi netermičkih efekata, naročito u vezi izloženosti RF/MW zračenjima koja su amplitudski modulirana na izuzetno niskim frekvencijama (ELF – reda 100 Hz) nisu niti eksperimentalno potvrđene, niti pojedinačno ponovljene. Tako je jedan od rezultata nedavnih istraživanja internacionalne agencije za ispitivanje raka (IARC) ukazao da RF/MW energija može imati kancerogeno dejstvo.

Grupa naučnika (Bellossi, Dubost, Moulinoux, Himdi, Ruelloux, Rocher) (53) izvršila je ispitivanje miševa u laboratorijskim uslovima, koji su pri tom bili izlagani zračenju elektromagnetnih talasa

na frekvenciji od 60 GHz (mikrotalasno područje). Eksperiment je urađen sa ciljem da se ispita da li je ovaj opseg frekvencija moguće nesmetano koristiti u oblasti bežičnih komunikacija. Za eksperiment su uzete 3 grupe miševa: jednu grupu činili su potpuno zdravi švajcarski miševi, drugu miševi kontaminirani L1210 (leukemičnim) ćelijama, a treću miševi kontaminirani ćelijama Lewis-ovog tumora. Po završenim eksperimentima mogla su se izvesti četiri važna zaključka. Pre svega, uočeno je da postoji individualna osetljivost pri izloženosti MW zračenju frekvencije 60 GHz. Kod miševa kontaminiranih L1210 ćelijama uočeno je da se vreme njihovog života uvećalo nakon izloženosti zračenjima, što predstavlja važnu informaciju s obzirom na ozbiljnost bolesti kakva je leukemija. Kod miševa sa Lewis-ovim tumorom uočen je porast tumora nakon zračenja, a aktivnost zdravih švajcarskih miševa bila je uvećana. U svakom slučaju, iz ove studije proizišlo je upozorenje naučnika o oprezu pre uvođenja frekvencijskog opsega od 60 GHz sistemima bežičnih komunikacija u zatvorenom prostoru.

Iako postoji još ovakvih istraživanja sa validnim rezultatima, biće potrebno još mnogo vremena, ali i truda da bi se dokazalo trajno štetno dejstvo RF/MW zračenja.

Standardi za izloženost zračenju

RF/MW standardi u oblasti zaštite od zračenja u suštini odnose se na propise, preporuke i granične vrednosti kojima se određuju maksimumi izlaganja zračenju u cilju zaštite ljudskog zdravlja. Tako su se 1953. godine pojavili prvi na naučnoj osnovi bazirani standardi, kojima je Schwan za granicu zračenja odredio vrednost 10mW/cm^2 (54). Ova vrednost je rezultat eksperimenta na termičkom modelu kojim je ograničen porast unutrašnje temperature izloženog pojedinca do najviše 1°C ako je apsorbovana oko polovina upadne energije. Ova vrednost je usvojena i iz razloga što su neke od studija pokazale da RF zračenja gustine snage čak i ispod vrednosti 100mW/cm^2 mogu izazvati pojavu katarakte oka. Mnoge organizacije usvojile su vrednost od 10mW/cm^2 kako bi je prilagodile svojim potrebama i ograničenjima, koja su se kretala od $100\ \mu\text{W/cm}^2$ pa do 100mW/cm^2 . Prvi projekat o standardima pojavio se 1960 godine. Objavila ga je Američka asocijacija za standarde (ASA) koja je kasnije postala Američki institut za nacionalne standarde (ANSI). 1982. godine pojavio se prvi standard o frekvencijskoj zavisnosti SAR. Godine 1991. IEEE komitet SCC-28 (Standards Coordinating Committee 28) objavio je novi IEEE C95.1-1991 standard (44), koji je zatim 1992. godine ANSI usvojila za američki nacionalni standard. Godine 1999. SCC-28 daje dopunu IEEE C95.1-1991 standarda. Za razliku od prethodnih, standard IEEE iz 1991. godine sadrži dve preporuke u vezi ograničenja frekvencijskog opsega (između 1 MHz i 3 GHz), koje potiču od različitosti okruženja u kojima se javlja zračenje. Tako se za izloženost zračenju opšte populacije, kao

što je npr. izloženost zračenju na javnim mestima, preporučuje 1/5 granice koja je data za izloženost zračenju u profesionalnu izloženost.

U svetu se najčešće korišćeni standardi zasnivaju na IEEE C95 standardima, na preporukama Nacionalnog saveta zaštite od radijacije i merenja (NCRP-National Council on Radiation Protection and Measurements), kao i na ograničenjima International Radiation Protection Association (IRPA) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (39).

Standardi zaštite od RF/MW zračenja baziraju se na rezultatima kritičkih procena i interpretacija značajnih naučnih istraživanja. Pri tom su u razmatranje uzeta sva laboratorijska i epidemiološka istraživanja koja prouzrokuju ma kakvu biološku reakciju, bilo da su to kratkoročne ili dugoročne ekspozicije. Na osnovu ovih procena usvojena je granična vrednost za SAR i to za najniži intenzitet zračenja pri kome je zabeležena reakcija, koja bi mogla biti štetna po ljude bez obzira na prirodu interakcionog mehanizma. Da bi se uzela u obzir i nepouzdanost pojedinih podataka i da bi se osigurali da su postavljene granice daleko ispod nivoa zračenja pri kojima bi se mogli pojaviti bilo kakvi negativni efekti, dobijene granične vrednosti su umanjene za neki proizvoljan zaštitni faktor, tako da su to najčešće vrednosti 10–50 puta niže od uočene granične vrednosti (bar što se tiče IEEE standarda i NCRP preporuka).

Tako je određena granica za poremećaj u ponašanju, koja za srednju vrednost SAR za celo telo i za životinjske vrste iznosi od 2–9 W/kg. Pri tom su u ovim eksperimentima korišćeni pacovi i nekoliko različitih vrsta majmuna, a testovi su obavljani na frekvencijama od 200 MHz do preko 5 GHz. Ovu graničnu vrednost prati i porast temperature tela, najčešće za oko 1°C . Svi pomenuti standardi (IEEE, NCRP i INCRP) vezani za izloženost RF/MW zračenju baziraju se na promenama u ponašanju i beleže za graničnu vrednost SAR 4 W/kg u širokom opsegu frekvencija od 100 kHz do 10 GHz. Faktor sigurnosti 10 uzet je za zračenje pri profesionalnoj izloženosti, npr. na radnom mestu, a dodatni faktor 5 za izloženost zračenju opšte populacije. Tako se u pomenutim standardima za maksimalnu srednju SAR za celo telo navodi vrednost od 0.4 W/kg za profesionalce i 0.08 W/kg za neprofesionalce. Jedva primetne razlike u ograničenjima, koje su postavile različite organizacije, iskorišćene su da bi se odredila maksimalna dozvoljena vrednost (MPE) zbog postojanja ljudi znatno osetljivijih na elektromagnetna zračenja.

Kroz aktivnosti Svetske zdravstvene organizacije na planu harmonizacije standarda različite ekspertske grupe rade zajednički ka razvoju jedinstvenog naučno baziranog svetskog standarda.

Zaključak

Brojna istraživanja uticaja elektromagnetnog zračenja u oblasti RF i MW frekvencija, a posebno na frekvencijama oko 900 MHz koje se primenjuju kod savremenih GSM mobilnih sistema, pokazuju da postoje određeni efekti zračenja na organizme.

Ljudski organizam predstavlja složenu strukturu sa elektromagnetne tačke gledišta koja je sastavljena od skupova organa i sistema na koje elektromagnetno zračenje različito utiče. Količina apsorbovane energije je funkcija frekvencije, položaja organizma u odnosu na pravac polja itd. U suštini razlikuju se dve vrste efekata elektromagnetnog zračenja – termički i netermički. Termički efekti su dosta dobro proučeni i dokazani i obuhvataju fiziološke efekte, efekte promene ponašanja itd. Sa druge strane, u vezi postojanja netermičkih

efekata postoje kontradiktorna mišljenja tako da se očekuje dalji istraživački rad u ovoj oblasti koji će dokazati ili opovrgnuti zasnovanost ovih efekata. Postojeći standardi bazirani su na naučnim saznanjima iz ove oblasti a posebno uzimaju u obzir termičke efekte. Razlike koje danas postoje među standardima posledica su različitih interpretacija naučnih saznanja. Cilj naučne svetske javnosti je objedinjavanje različitih standarda u jedan jedinstveni.

Literatura

1. Aldair ER, Peterson RC. Biological Effect of Radio-Frequency / Microwave Radiation, IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique March 2002; 50(3).
2. Schwan HP. History of the genesis and development of the study of low energy electromagnetic fields, in Biological Effects and Dosimetry of Non-Ionizing Radiation, Grandolfo M, Michaelson S, A. Rindi. New York 1981; Plenum, 1–17.
3. Osepchuk JM. Basic characteristics of microwaves. Bull. New York Academy Med. 1979; 55: 976–98.
4. Durney CH, Massoudi H, Iskander MF. Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook 4th ed, Brooks AFB, TX: USAF School Aersp. Med. 1986.
5. Balzano Q, Chou C-K, Cicchetti R, Faraone, Tay R Y-S. An Efficient RF Exposure System with Precise Whole-Body Average SAR Determination for in vivo Animal Studies at 900 MHz, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000;48(11): 2040–9.
6. Frei MR, Berger RE, Dusch SJ, Guel V, Jauchem JR, Merritt JH, et al. Chronic exposure of cancer-prone mice to low level 2450 MHz radiofrequency radiation, Bioelectromagnetics 1998;19(1): 20–31.
7. Frei MR, Jauchem JR, Dusch SJ, Merritt JH, Berger RE, Stedham MA. Chronic low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz microwaves, Radiat Res 1998; 150: 568–76.
8. Toler JC, Shelton WW, Frei MR, Merritt JH, MAStedham. Long-term, low-level exposure of mice prone to mammary tumors to 435 MHz radiofrequency radiation. Radiat Res 1997; 148(3): 227–34.
9. Chou C-K, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH. Long-term low-level microwave irradiation of rats, Bioelectromagnetics 1992;13(6): 469–96.
10. Mason PA, Walters TJ, DiGiovanni J, Beason CW, Jauchem JR, Dick EJ, et al. Lack of effect of 94 GHz radio frequency radiation exposure in an animal model of skin carcinogenesis, Carcinogenesis 2001; 22(11): 101–8.
11. Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW. Lymphomas in E-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. Radiat Res 1997;147(5):631–40.
12. Lin JC. Cellular-Phone Radiation Effects on Cancer in Genetically Modified Mice. IEEE Antenna's and Propagation Magazine. December 2002; 44(6):165–8.
13. Utteridge TD, Gebiski V, Finnie JW, Vernon-Roberts B, Kuchel TR. Long-Term Exposure of E-mu-Pim1 Transgenic Mice to 898.4 MHz Microwaves Does Not Increase Lymphoma Incidence. Radiation Research 2002; 158: 357–64.
14. Hirata A, Morita M, Shiozawa T. Temperature Increase in the Human Head Due to a Dipole Antenna at Microwave Frequencies. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility February 2003;45(1): 109–16.
15. Guyton AC, Hall JE. Textbook of Medical Physiology. Philadelphia PA: Saunders 1996, ch. 73.
16. Adair ER, Adams BW, Akel GM. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. Bioelectromagnetics 1984; 5: 13–30.
17. Hardy JD, Wolff HG, Goodell H. Pain Sensations and Reactions. Baltimore MD: Williams&Wilkins 1952; chapters IV and X.
18. Hirata A, Katayama T, Shiozawa T, Thermal effects in the human head for exposure to EM waves emitted from terminals for mobile satellite services. Presented at Proc. 10th IEEE Int. Symp. Personal Indoor and Mobile Radio Communications.
19. Morita M, Hirata A, Shiozawa T. Temperature increases in the human head exposed to EM waves emitted from a dipole antenna at various microwave frequencies, in Proc. OFSET 2000, Osaka, Japan, Dec. 2000; 283–6.
20. Gandhi OP, Li Q-X, G. Kang. Temperature increase for the human head for cellular telephones and for peak SARs prescribed in safety guidelines, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Sept. 2001; 49: 1607–13.
21. Adair ER. Thermoregulation in presence of microwave fields, in Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2nd ed, C. Polk and E. Postow, Eds. Boca Raton, FL: CRC Press 1996; 404–30.
22. Candas V, Adair ER, Adams BW. Thermoregulation adjustments in squirrel monkeys to microwaves at high power densities. Bioelectromagnetics 1985; 6(3): 221–3.
23. Lotz WG, Saxton JL. Metabolic and vasomotor responses of rhesus monkeys exposed to 225 MHz radiofrequency energy, Bioelectromagnetics 1987;8(1): 73–89.
24. Thermoregulatory responses in the rhesus monkey during exposure at a frequency (225 MHz) near whole-body resonance, in Electromagnetic Fields and Neurobehavioral Function, O'Connor ME, Lovely RH. Eds. New York: Alan R. Liss 1998; 203–18.
25. Adair ER, Adams BW, Hartman SK. Physiological interaction processes and radio frequency energy absorption, Bioelectromagnetics 1992;13(6): 497–512.
26. Lotz WG, Hyperthermia in radiofrequency-exposed rhesus monkeys; A comparison of frequency and orientation effects, Radiat. Res. 1985;102: 59–70.
27. Adair ER, Adams BW. Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey, Bioelectromagnetics, 1980;1(1): 1–20.

28. Adair ER, Microwave challenges to the thermoregulatory system, in *Electromagnetic Fields and Neurobehavioral function* O'Connor ME, Lovely RH, Eds. New York: Alan R. Liss 1998; 179–201.
29. Adair ER, Kelleher SA, Mack GW, Morocco TS. Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz, *Bioelectromagnetics* 1998;19(4): 232–45.
30. Adair ER, Cobb BL, Mylacraine KS, Kelleher SA. Human exposure at two radio frequencies (450 and 2450 MHz): Similarities and differences in physiological response, *Bioelectromagnetics* 1999; (4): 12–20.
31. Adair ER, Kelleher SA, Berglund LG, Mack GW. Physiological and perceptual responses of human volunteers during whole-body RF exposures at 450 MHz. in: *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Bersani F, Ed. New York: Plenum, 1999; 613–6.
32. Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Partial-body exposures of human volunteers to 2450 MHz pulsed or CW fields provokes similar thermoregulatory responses, *Bioelectromagnetics* 2001; 22(4): 246–59.
33. Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Human exposure to 2450 MHz CW energy at levels outside the IEEE C95.1 standard does not increase core temperature, *Bioelectromagnetics* 2001; 22: 429–39.
34. Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio frequency Electromagnetic fields, IEEE Standard C 95.1-1991, 1999.
35. Hendler E, Hardy JD, Murgatroyd D. Skin heating and temperature sensation produced by infrared and microwave radiation, in *Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry*. Herzfeld CM, Ed. New York: Reinhold, 1963; pt. 3, 3: 211–30.
36. Justesen DR, Adair ER, Stevens JC, Bruce-Wolfe V. A comparative study of human sensory thresholds: 2450-MHz microwaves vs. far-infrared radiation, *Bioelectromagnetics* 1982;3(1): 117–25.
37. Blick DW, Adair ER, Hurt WD, Sherry CJ, Walters TJ, Merritt JH. Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin, *Bioelectromagnetics*. 1997; 18(6) 403–7.
38. Brown DO, Lu S-T, Elson EE. Characteristics of microwave evoked body movements in mice, *Bioelectromagnetics*. 1994; 15(2): 143–61.
39. Djindjic B, Radic S, Krstic D, Sokolovic D, Pavlovic T, Petkovic, et al. J. Exposure to electromagnetic fields by using mobile telephones and its influence on the brain function. *Facta Universitates, Series Working and Living Environmental Protection* 2003, 2.
40. Djindjic B, Krstic D, Petkovic D, Radic S, Cvetkovic M. Medicinski aspekti štetnog delovanja elektromagnetnog polja industrijskih učestanosti na moždane funkcije. *Ocena profesionalnog rizika – Teorija i praksa* Nis Decembar 2003; 23.
41. Krstić D, Djindjic B, Kocic G, Petkovic D, Radic S, Sokolovic D. Štetna delovanja elektromagnetnog polja učestanosti 50 Hz na biološke sisteme. *Acta Medica Medianae* 2003; 42:11–15.
42. Djindjic B, Sokolovic D, Radic S, Pavlovic D, Krstic D. Biochemical effect of long-term nonionizing radiation on hepatocytes in rats. *Jug. Med. Biohem* 2003; 22: (suppl 2):190
43. DeLorge JO. The thermal basis for disruption of operant behavior by microwaves in three animal species, in *Microwaves and Thermoregulation*, Adair ER, Ed. New York: Academic, 1983; 379–99.
44. Safety Level with respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300 kHz to 100 GHz, ANSI Standard C95.1-1982, 1982.
45. Effects and exposure criteria for radio frequency electromagnetic fields, *Nat. Council Rad. Protection Meas*, Bethesda, MD, NCRP Rep. 86, 1986.
46. Board statement on restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation documents of the NRPB, *Nat. Rad. Protection Board*, Chilton, Didcot, Oxon., U.K., Doc. NRPB 1993; 4(5).
47. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)-ICNIRP guidelines, *Health Phys.*, 1998;74(4): 494–522.
48. Guy AW, Taylor EM, Ashelman B, Lin JC. Microwave interaction with the auditory system of humans and cats, in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boulder, CO, 1973; 231–2.
49. Guy AW, Chou C-K, Lin JC, Christensen D, Microwave induced acoustic effects in mammalian auditory systems and physical materials, in *Biologic Effects of Nonionizing Radiation*, P. W. Tyler, Ed. New York: New York Acad. Sci., 1975; 247: 194–218.
50. Lin JC, *Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy*, O. Gandhi, Ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990; 278–318.
51. Stewart SW, *Mobile phones and health*, Independent Expert Group on Mobile Phones, NRPB, Chilton, Didcot, Oxon., U.K., 2000.
52. Carlo G, Ed, *Wireless Phones and Health: State of the Science*. Norwell, MA: Kluwer, 2001.
53. Bellossi A, Dubost G, Moulinoux JP, Himdi M, Ruelloux M, Rocher C. *Biological Effects of Millimeter-Wave Irradiation on Mice-Preliminary Results*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, November 2000; 48(11): 2104–10.
54. Mumford WW. Some technical aspects of microwave radiation hazards, *Proc. IRE*, Feb. 1960; 427–47.

Rad je urađen u okviru naučnog projekta Ministarstva za nauku i tehnologiju i razvoj pod nazivom: Praćenje patogenetskih, morfometrijskih i funkcionalnih promena nakon ekspozicije elektromagnetnom zračenju, kojim rukovodi prof. dr Stojan Radić.

BIOLOGICAL EFFECTS OF EXPOSURE TO MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

*Dejan D. Krstic, Vera V. Markovic, Natasa M. Nikolic,
Boris Djindjic, Stojan S. Radic, Dejan M. Petkovic and Milan D. Markovic*

The rapid development of wireless communication systems and the use of mobile phones by all categories of the population focuses the attention to the questions of the risks associated with the electromagnetic field exposure. Mobile devices, base stations for mobile communications, broadcasting transmitters, etc. produce high-frequency electromagnetic fields, which biological influence was intensively investigated, especially during the last decade. It is a common opinion in the existing literature that two groups of effects can be considered: thermal and non-thermal. There are clear evidences of the existence of thermal effects and a comprehensive overview of them is given in this paper. On the other hand, there are some contradictory reports regarding the existence of non-thermal effects caused by a long-term exposure to the low-level electromagnetic field, thus further research should give the right answers. Taking into account the possible effects of the high-frequency electromagnetic radiation is very important from the aspect of further work on the standards for exposure limits. *Acta Medica Medianae 2004; 43(4): 55–63.*

Key words: *biological effect of electromagnetic radiation, specific absorption rate (SAR), electromagnetic radiation effect, safety standard*