

ELEKTROMAGNETICKÁ POLE JAKO MOŽNÝ PATOGENETICKÝ ČINITEL

F. Vožeh

Ústav patologické fyziologie LF UK v Plzni, Biomedicínské centrum

Problémem rozvoje lidské civilizace je, že ruku v ruce se snazším způsobem života přibývá i vedlejších neblahých důsledků. Některé z nich vnímáme našimi smysly jiné nikoliv. Příkladem prvních je např. *smog* (termín pro ovzduší znečištěné mlhou a exhalacemi, vniklý spojením anglických slov *smoke* a *fog*). Od tohoto termínu pak je odvozený i název pro nadměrné večerní a noční osvětlení – *světelný smog*, ale také *elektrosmog*, tj. slovo, které označuje nadbytek našimi smysly naopak nepostřehnutelného elektromagnetického „znečištění“ jako důsledku lidských aktivit.

Působení přirozených (elektro)magnetických polí (geomagnetické pole Země) i elektromagnetickému záření různých vlnových délek (viditelné světlo, infračervené a ultrafialové záření) jsou vystaveny všechny živé organismy od prvopočátku vzniku života na naší planetě, včetně člověka. A abychom byli zcela přesní, bez zemské magnetosféry, kterou zmíněné geomagnetické pole vytváří, by život na Zemi v současné podobě, nebyl vůbec možný. Je tomu tak proto, že magnetosféra kolem naší rodné planety představuje ochranný plášť, který odchyluje z kosmického prostoru přicházející a životu nebezpečné elektricky nabitě částice, jež by na Zem zcela jistě dopadly. Problémem dnešní doby je však to, že kolem nás stále více přibývá arteficiálních zdrojů elektromagnetického záření, kdy v důsledku užívání různých elektrických přístrojů a zařízení, dnes již neodmyslitelně spjatých s činností člověka, jsme vystaveni stále většímu přísunu této energie prakticky všude a to v každou denní i noční dobu.

Faktický obsah elektrosmogu tedy představuje neionizující elektromagnetické záření, které je převážně původu nepřirozeného, tedy generovaného člověkem. Toto vlnění v rozsahu 0 Hz – 300 GHz, jehož značnou část tvoří záření radiofrekvenční (RF) a mikrovlnné (MW), zaujímá relativně značnou část elektromagnetického spektra (100 kHz – 300 GHz) zvaného vysokofrekvenční (VF). Zejména oblast viditelného světla (390–790 THz) je v tomto srovnání zcela minoritní. Část elektromagnetického spektra pod 100 kHz pak představuje nízkofrekvenční (NF) elektromagnetické záření. Přitom, 0 Hz má statické magnetické pole Země anebo jsou jeho zdrojem zařízení vytvořená člověkem, např. přístrojový systém pro vyšetření magnetickou rezonancí (MR). Neionizující část elektromagnetického záření poté ještě doplňují paprsky infračervené a ultrafialové. Konečně, část spektra s největší frekvencí vlnění tvoří paprsky X (Rentgenovy) a gama, tedy elektromagnetické záření ionizující.

Právě z důvodu stále častějšího exponování člověka různým druhům elektromagnetického záření, ať již úmyslnému (vyšetření MR, skenovací mikrovlnné zobrazování pro diagnostické či bezpečnostní účely) anebo neúmyslnému, tj. jako průvodnímu jevu při používání elektrických přístrojů a spotřebičů (mobilní telefony, počítače, rádiové a TV vysílače i přijímače, radary), veřejnost byla a je, zcela oprávněně, zvědavá na možné zdravotní konsekvence tohoto jevu. Stále častěji se totiž objevovaly a nadále přicházejí zprávy, některé více, jiné méně průkazné, o negativním dopadu tohoto záření na lidské zdraví a jeho vztahu k některým závažným nemocem. Na tento hlad po validních informacích a eventuálních protektivních opatřeních reagovala již před léty Světová zdravotnická organizace (WHO), jednak výzvou k serióznímu výzkumu v této oblasti a jeho podporou, a na jeho podkladech pak také vydáním některých závazných pokynů a doporučení. Jako první významné opatření to bylo v r. 2007 v souvislosti s rizikem působení NF elektromagnetického pole (WHO Fact sheet No. 322, June 2007, Electromagnetic fields and public health; Exposure to extremely low frequency fields). Důvodem této akce byly výsledky zejména epidemiologických studií, které naznačovaly příčinnou souvislost mezi působením tohoto typu elektromagnetického záření s např. vážným míšním onemocněním (amyotrofická laterální skleróza), dětskou leukémií a nádory mozku u dospělých osob. Přestože, jak ještě bude uvedeno, dopady působení NF elektromagnetického pole na živé systémy, potažmo člověka, jsou jednoznačnější, než u VF elektromagnetického záření, také zde i přes pokračující výzkum a četné zasvěcené i méně zasvěcené diskuse, WHO vydala v r. 2011 další významné opatření. V tomto případě se jedná o případná rizika působení VF elektromagnetických polí a to zejména s ohledem na masově celosvětově rozšířené užívání mobilních telefonů (WHO Fact sheet No. 193, June 2011, Electromagnetic fields and public health: mobile phones). Toto opatření vychází z faktu, že na přelomu let 2009 – 2010 bylo ve světě registrováno téměř 5 miliard mobilních telefonů (v r. 2014 má počet „smartphones“ dosáhnout 6 miliard a u nás bude registrováno až 14 milionů aktivních SIM karet). Jedná se tak, nehledě na další zdroje VF elektromagnetického záření, o dosud nejrozsáhlejší biologický pokus uskutečňovaný na lidech. Z doporučení tohoto opatření je, vedle stanovených limitních dávek ve tkáních absorbovaného záření SAR (Specific Absorption Rate) udávaných ve W/kg váhy, na základě doporučení Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (IARC), také ustanovení o zařazení RF elektromagnetického záření do skupiny 2B, potenciálně karcinogenních vlivů na člověka. Stalo se tak proto, že i přes nedostatek přesvědčivých důkazů o karcinogenitě tohoto záření, tuto možnost nelze v současné době vyloučit.

PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ NA ŽIVÉ SYSTÉMY

I když vliv elektromagnetických polí (EMP) na živé organismy, tkáně a buňky se jeví být stále více nepochybným, důkazy pro toto konstatování naprosto jednoznačné nejsou, ba někdy jsou experimentální nálezy až protichůdné. I tak je však možno zmínit některé výsledky výzkumu, které lze jen těžko zpochybnit. V prvé řadě se to týká oxidoredukčních procesů, kde přibývá prací o tom, že expozice EMP (stejně jako vystavení i jiným neg-

ativním environmentálním faktorům) vede ve tkáních ke zvýšené tvorbě tzv. volných kyslíkových radikálů, neboli k oxidačnímu stresu (1–6). O tomto jevu je pak známo, že příčinně spolupůsobí u řady patologických stavů. Přestože to bylo zjištěno především v souvislosti s expozicí NF EMP (extremely low electromagnetic fields – EL-EMFs), jsou dnes důkazy o tom (včetně výsledků z naší laboratoře), že podobně mohou působit i VF EMP (7, 8, 9). Na buněčné a subbuněčné úrovni pak tyto procesy mohou vést (působením na spin elektronů a jejich energetické hladiny) až k narušení chemických vazeb mezi atomy, poškození biologických membrán, a při zablokování vlastních antioxidačních systémů, k následné i genotoxicky způsobené (vlivem na DNA) destrukci buněk. Toto bylo experimentálně prokázáno již dříve, ale i zcela recentně jak na nižší živočišné úrovni (červi), tak u savců (laboratorní potkani) (10–14). Zde bylo navíc prokázáno, že uvedený cyto- a genotoxický efekt se více projevil u mláďat ve srovnání s dospělými jedinci. Přitom podobně kontroverzní jako názor odborníků na biologické efekty EMP, je vysvětlení těchto mechanismů s ohledem na tepelné a netepelné účinky zejména radiofrekvenčního (RF) záření (15). Přestože se dnes stále více vědců i dalších více či méně povolaných osob, věnujících pozornost této problematice, kloní k názoru, že působení EMP v živých tkáních má vedle tepelných také netepelné účinky (16) je stále řada těch, kteří možnost tzv. netermálního vlivu RF EMP připustit nechtějí. Podstatou změn ve tkáních podle nich může být pouze termální efekt, tedy vzestup teploty, generovaný přeměnou energie VF EMP a to v důsledku zvýšené vibrace atomů a molekul (17). Zastánci netepelných účinků naopak soudí, že RFP vyvolávají ve tkáních elektrické proudy, které bez ohledu na tepelné změny ovlivňují pohyb iontů (především kalcia), čímž se mění propustnost buněčných membrán (18, 19, 20). Výsledkem je změna v elektrochemickém gradientu buněk a postižení na kalcium závislých enzymatických systémů včetně metaloproteáz a také mitogenem aktivované protein kinázy (MAPK). V souvislosti s těmito jevy dochází k výše uvedenému oxidačnímu stresu i poškození DNA (21, 22, 23). Zde je však třeba zmínit, že ve své podstatě se jedná o procesy, které mohou vést k povzbuzení prorůstových mechanismů spouštěných i v případě jiných typů buněčného poškození (mechanická, vlivem ionizujícího záření). V závislosti na velikosti dávky RF záření proto může být zpočátku patrná i hyperaktivita někdy s prvotním „zlepšením“ funkce (24); teprve větší dávka či prodloužená expozice (anebo obojí), pak zapříčiní destrukci. To by mohlo vysvětlit i již zmíněné, mnohdy protichůdné nálezy. Naopak, na podporu této teorie lze uvést výsledky experimentálního výzkumu, kdy podání antioxidantů, předcházející expozici RF EMP, zamezilo vzniku volných kyslíkových radikálů a rozvoji oxidačního stresu (25). Rozporný náhled na to, zda jde o netepelné účinky, či je-li zde přítomen nepřímý tepelný efekt to však (prozatím) neřeší.

PŮSOBENÍ EMP NA NERVOVÝ SYSTÉM

Výše uvedené skutečnosti v podstatě zobecňují problematiku biologických účinků EMP na základě publikovaných experimentálních poznatků získaných pozorováním, jak buněčných a tkáňových kultur, tak nižších i vyšších živočichů včetně člověka. Přesto je namístě věnovat zde ještě speciálně pozornost nervovému systému, především mozku.

Důvodem je to, že právě hlava a mozek člověka jsou dnes, zejména v souvislosti s mobilními telefony, nejvíce exponovanou částí těla, se kterou jsou tyto přístroje převážně v přímém kontaktu (pomineme-li např. nošení mobilů v kapse kalhot mužů, kdy – díky permanentnímu spojení s vysílači – mohou být ovlivněny i reprodukční orgány, kde následkem je, v řadě publikací uváděná, horší kvalita spermatu (26–33). V neposlední řadě dalším důvodem je i odborné zaměření našeho pracoviště na neuropatofyziologii, v posledních letech také s ohledem na působení EMP.

O mozku je známo, že představuje pouze 2 % hmotnosti lidského těla, avšak spotřebuje až 20 % celkového množství do organismu dodávaného kyslíku. Svědčí to o mimořádně aktivním energetickém metabolismu, kde navíc nejsou žádné zásobní zdroje energie (především glukózy), ani schopnost pracovat na kyslíkový dluh, jakou disponuje např. kosterní sval. To má za následek, že bez přísunu kyslíku (např. při zástavě krevního oběhu) člověk ztrácí okamžitě vědomí a trvá-li to déle, než 5–6 min, dochází ke smrti mozku a zániku individua. Přestože většina kyslíku a glukózy po uvolnění energie končí jako oxid uhličitý a voda, vzniká zde i malé množství vysoce reaktivních volných kyslíkových radikálů. Ty, působením na polynenasycené mastné kyseliny, bohatě v mozku zastoupené (jako součást buněčných membrán), činí tento orgán, vzhledem k vysokému energetickému obratu a v souvislosti s oxidačním stresem, značně vulnerabilním. V tomto směru, alespoň podle poměru publikovaných prací svědčících o významném účinku NF EMP (EL-EMFs), není o vyvolání oxidačního stresu tímto zářením pochyb (34–39). Navíc řada prací prokazuje, že zároveň dochází k redukci organismu vlastních antioxidačních, hlavně enzymatických mechanismů (40–45), což potencuje toxický efekt volných kyslíkových radikálů vzniklých peroxidací lipidů (46). Pokud jde o podobný efekt VF EMP (HF EMFs), zde často popisované potíže lidí neurologického rázu, včetně bolestí hlavy, poruch spánku, změn neuronální elektrické aktivity (47, 48) spolu se změnami v uvolňování neuromediátorů, budou též nejspíše v souvislosti s oxidačním stresem (49, 50, 51). Také zde převažují práce, které prokázaly přítomnost markerů oxidačního stresu a potlačení antioxidačních mechanismů po přesně definovaných expozicích RF EMP (900 MHz i 1800 MHz) v experimentech prováděných *in vivo* i *in vitro* (11, 52–55). A také v obou typech pokusů došlo ke zmírnění negativního dopadu oxidačního stresu po předchozím podání antioxidantů

Aby byl výčet potenciálních dopadů EMP na mozek pokud možno úplný, je vhodné zmínit ještě případné souvislosti se vznikem nádorů a neurodegeneracemi. Jak již bylo uvedeno v úvodu na základě dosud známých zjištění, není dnes možné s absolutní jistotou vyloučit NF a VF elektromagnetické záření jako potenciální karcinogenní činitele (56, 57). Proto byly také vydány již zmíněné směrnice WHO a stanoveny příslušné bezpečnostní normy pro zacházení s ním. Oprávněná opatrnost v tomto směru je namísto především z toho důvodu, že je prokázána nepochybná role oxidačního stresu při vzniku nádorů a dále, že existují vědecké práce epidemiologického charakteru, které ukazují na souvislost dlouhodobého užívání mobilních telefonů také s výskytem některých mozkových nádorů a to i ve vztahu k lateralitě. Bylo v nich prokázáno, že na té straně hlavy, kde byl převažující kontakt s přístrojem, byl počet malignit (jednalo se především o gliomy a neurinomy VIII. hlavového nervu) významně vyšší, než na opačné (58, 59, 60). Pokud jde o další nervové poruchy, především pak mozkové neurodegenerace, je zde nejednot-

nost názorů ještě více patrná, než v situacích už zmíněných. Z nervových poruch, které jsou v řadě prací dávány do souvislosti s vystavením mozku EMP, je to především stále častější výskyt autismu (zde je obviňován vliv EMP na mozek ještě v době nitroděložního vývoje a raného dětství, díky hyperaktivitě neuronů a nesprávně regulované novotvorbě synapsí) (61). Z neurodegenerativních chorob pak jde o Alzheimerovu demenci (AD), kde se sice uznává multifaktoriální etiologie, avšak s podílem vlivu EMP (62, 63) a to také v souvislosti s experimentálně prokázanou zvýšenou propustností hematoencefalické bariéry pro vysokomolekulární sloučeniny, normálně skrze ni neprocházející, po jejich průniku však toxických pro mozkové neurony (64, 65, 66). Na druhé straně jsou však k dispozici práce (na zvířecích modelech AD), které naopak naznačily příznivý vliv dlouhodobé RF stimulace na kognitivní funkce a ukázaly na případnou možnost využití této formy neinvazivní a nefarmakologické terapie (67, 68). Obdobný příznivý efekt, při nízké SAR RF záření (GSM 900), byl popsán také u modelu Parkinsonovy nemoci (69). U této choroby je již ostatně znám příznivý terapeutický efekt transkraniální magnetické stimulace v ranku NF elektromagnetického záření, která může být metodou volby u některých pacientů (70, 71). Příznivý neuroprotektivní účinek NF EMP byl následně pozorován také u animálního modelu Huntingtonovy choroby (72, 73, 74). Nejasný potom zůstává vztah působení EMP a vzniku amyotrofické laterální sklerózy, i když společně s AD je u těchto dvou neuropatologií popsána etiologická souvislost s faktory danými typem zaměstnání, mezi kterými je téměř vždy přítomno NF i VF elektromagnetické záření (75–78). V každém případě je však nepochybně to, že biologický účinek EMP je významně závislý na dávce záření, jeho frekvenci, době či dobách expozice a samozřejmě též na individuální senzitivitě exponovaného objektu (dané např. věkem, dědičností, ale i dalšími faktory). A co tedy říci na závěr tohoto sdělení? Elektromagnetickému záření z přirozených, a na daném stupni civilizace, ani z arteficiálních zdrojů se lidé vyhnout nemohou. O tom, že elektromagnetická pole mají biologické účinky, jak se prokazuje, není pochyb. Není však stále ještě dostatek znalostí o tom, do jaké míry jsou tyto dopady ještě reversibilní a naopak, kdy už jsou ireversibilní a zdraví škodlivé. Používání přístrojů emitujících elektromagnetické záření (radiové a TV vysílače, mobilní telefony, radary, léčebné i diagnostické přístroje aj.) život lidem nejen usnadňují a příjemnější, ale mnohdy i zachraňují. Lidská existence bez nich zkrátka není možná. Na druhou stranu je, na základě dosud shromážděných pozorování, zřejmé, že za vše pozitivní platíme určitou daň. Nevíme však zatím, jak je vysoká, ani jakou má dobu splatnosti. Víme však, že se týká toho nejcennějšího, co máme a často sobě i svým blízkým upřímně přejeme, tedy našeho zdraví. Cílem nás všech, tedy uživatelů, výrobců, ale i těch, kteří se této problematice věnují výzkumně, by mělo být to, aby zmíněná daň byla co nejnižší. Pro výrobce je to jednoznačný imperativ – vyrábět stále bezpečnější přístroje. Uživatelé by pak měli dbát o to, aby ty přístroje, jejichž používání mohou ovlivnit, užívali pokud možno bezpečně, střídavě a zejména v dětském věku, (především mobilní telefony), co nejméně. Pro výzkumníky pak platí, aby podmínky experimentů byly co nejstandardnější, s přesně definovanými parametry, protože protichůdnost dosavadních výsledků je nepochybně zapříčiněna i tím, že tomu tak mnohdy nemusí být.

Podporováno Programem rozvoje vědních oborů Karlovy Univerzity (projekt P36) a projektem ED2.1.00/03.0076 Evropského fondu pro regionální rozvoj.

Elektromagnetická pole (EMP), která jsou v našem prostředí všude kolem, mohou být jak přirozeného původu, tak vzniklé v důsledku lidských aktivit. Zatímco ta přirozeně vzniklá, a zde se jedná především o geomagnetické pole Země zvané zemská magnetosféra, jsou užitečná, protože chrání všechny živé tvory na zeměkouli před smrtícím kosmickým zářením, ta člověkem vytvořená, nazývaná elektrosmogem, mohou lidskému zdraví škodit. To prokázaly výsledky řady především epidemiologických studií, které naznačovaly příčinnou souvislost mezi působením nízkofrekvenčního (NF) elektromagnetického záření a např. vážným míšním onemocněním (amyotrofická laterální skleróza), dětskou leukémií a nádory mozku u dospělých osob. Světová zdravotnická organizace (WHO) na tato zjištění reagovala v r. 2007 vydáním významného opatření v souvislosti s rizikem působení nízkofrekvenčního NF EMP (WHO Fact sheet No. 322, June 2007, Electromagnetic fields and public health; Exposure to extremely low frequency fields). Naproti tomu, přes pokračující výzkum v této problematice, nejsou negativní dopady vysokofrekvenčního (VF) EMP na živé systémy v současnosti tak jednoznačné, jako u NF EMP. Přesto však, vzhledem k celosvětově dramatickému nárůstu počtu uživatelů mobilních telefonů (jako jednoho z hlavních zdrojů HF EMF) vydala WHO v r. 2011 další významné opatření (WHO Fact sheet No. 193, June 2011, Electromagnetic fields and public health: mobile phones). Z doporučení tohoto opatření je, vedle stanovených limitních dávek ve tkáních absorbovaného záření SAR (Specific Absorption Rate), na základě doporučení Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (IARC), také ustanovení o zařazení RF elektromagnetického záření do skupiny 2B, potenciálně karcinogenních vlivů na člověka. Stalo se tak proto, že i přes nedostatek přesvědčivých důkazů o karcinogenitě tohoto záření, tuto možnost nelze v současné době vyloučit. Je tomu tak proto, že v interakcích EMP s biologickými systémy může docházet k oxidačnímu stresu. Navíc je známo, že v těchto situacích ve tkáních vznikající volné kyslíkové radikály plní vedle svých fyziologických funkcí také roli významného patogenetického činitele u řady nemocí jako jsou nádory, neurodegenerace a další. Proto tato práce věnuje pozornost významným novým poznatkům publikovaným z této problematiky s cílem odpovědně zhodnotit současný stav výzkumu a patřičně koncipovat další potřebný výzkum v této oblasti.

Electromagnetic fields as a possible pathogenetic factor

SUMMARY

Electromagnetic fields (EMFs) surrounding us in our environment originate from both natural and manmade sources. While those of natural origin, mainly geomagnetic field of the Earth, which creates so called Earth's Magnetosphere, are useful – for the reason of protection all living creatures against lethal effects of the space radiation – the artificial EMFs arising from man activities, named electrosmog, can be harmful to human health.

On the basis of results of epidemiological studies, an increased risk for childhood leukemia, amyotrophic lateral sclerosis, adult brain cancers associated with Extremely Low Frequency (ELF) EMF, was by World Health Organization (WHO) declared. Therefore, WHO issued Fact sheet No. 322, June 2007, Electromagnetic fields and public health; Exposure to extremely low frequency fields, dealing with precautions against the negative impacts of ELF-EMFs. Despite continuous research, the evidence about negative impact of high frequency (HF) EMFs is not so consistent as they is in case of ELF-EMFs. Nevertheless, because of dramatic worldwide increase of mobile phone users, the WHO issued Fact sheet No. 193, June 2011, Electromagnetic fields and public health: mobile phones. Its content, in addition to determining the limit dose in the tissues of the absorbed radiation SAR (Specific Absorption Rate), based on the recommendations of the International Agency for Research on Cancer (IARC), also deals with provisions relating to the classification of RF electromagnetic radiation in group 2B, with possible carcinogenic effects on humans. It is because of EMFs interaction with biological systems may cause oxidative stress. Given that free oxygen radicals, in addition to physiological processes, also act as an important pathogenetic factor in many diseases, such as cancer, neurodegeneration, etc., this article pays attention mainly to the last published evidences with the aim to contribute to the proper assessment of previously obtained results and to right way preparation of further necessary research of this issue.

LITERATURA

1. Irmak M. K., Fadillioğlu E., Güleç M. et al.: Effects of electromagnetic radiation from a cellular telephone on the oxidant and antioxidant levels in rabbits. *Cell Biochem. Funct.* 20 (4), 2002: 279–83. – 2. Zeni O., Di Pietro R., d'Ambrosio G. et al.: Formation of reactive oxygen species in L929 cells after exposure to 900 MHz RF radiation with and without co-exposure to 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2 (5H)-furanone. *Radiat. Res.* 167 (3), 2007: 306–11. – 3. Luukkonen J., Hakulinen P., Mäki-Paakkanen J. et al.: Enhancement of chemically induced reactive oxygen species production and DNA damage in human SH-SY5Y neuroblastoma cells by 872 MHz radiofrequency radiation. *Mutat Res.* 662 (1–2), 2009: 54–8. – 4. Höytö A., Luukkonen J., Juutilainen J. et al.: Proliferation, oxidative stress and cell death in cells exposed to 872 MHz radiofrequency radiation and oxidants. *Radiation Res.* 170, 2, 2008: 235–243. – 5. Tomruk A., Guler G., Dincel A. S.: The influence of 1800 MHz GSM-like signals on hepatic oxidative DNA and lipid damage in nonpregnant, pregnant, and newly born rabbits. *Cell Biochem. Biophys.* 56 (1), 2010: 39–47. – 6. Consales C., Merla C., Marino C. et al.: Electromagnetic fields, oxidative stress, and neurodegeneration. *Int. J. Cell Biol.* 2012, 2012: 1–6. – 7. Friedman J., Kraus S., Hauptman Y. et al.: Mechanism of short-term ERK activation by electromagnetic fields at mobile phone frequencies. *Biochem. J.* 405, 3, 2007: 559–568. – 8. Oktem F., Ozguner F., Mollaoglu H. et al.: Oxidative damage in the kidney induced by 900-MHz- emitted mobile phone protection by melatonin. *Arch. Med. Res.* 36, 4, 2005: 350–355. – 9. Zmyslony M., Policanski P., Rajkowska E. et al.: Acute exposure to 930 MHz CW electromagnetic radiation in vitro affects reactive oxygen species level in rat lymphocytes treated by iron ions. *Bioelectromagnetics.* 25, 5, 2004: 324–328. – 10. Xu Z. P.: Exploring the biological effects of electromagnetic fields systematically, and setting electromagnetic environment management policy reasonably. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi.* 27 (9), 2009: 513–5. – 11. Xu S., Zhou Z., Zhang L. et al.: Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons, *Brain Res.* 22, 2009: 189–96. – 12. Sekeroğlu V., Akar A., Sekeroğlu Z. A.: Cytotoxic and genotoxic effects of high-frequency electromagnetic fields (GSM 1800 MHz) on immature and mature rats. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 80, 2012: 140–4. – 13. Tkalec M., Stambuk A., Srut M. et al.: Oxidative and genotoxic effects of 900 MHz electromagnet-

ic fields in the earthworm *Eisenia fetida*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 90, 2013: 7–12. – 14. Bodera P., Stankiewicz W., Zawada K. et al.: Changes in antioxidant capacity of blood due to mutual action of electromagnetic field (1800 MHz) and opioid drug (tramadol) in animal model of persistent inflammatory state. *Pharmacol. Rep.* 65 (2), 2013: 421–8. – 15. Challis L. J.: Mechanisms for interaction between RF fields and biological tissue. *Bioelectromagnetics Suppl.* 7, 2005: S98–S106. – 16. Behari J.: Biological responses of mobile phone frequency exposure. *Ecotoxicol. Environ. Safety.* 90, 2013: 7–12. – 17. Foster K. R., Glaser R.: Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines. *Health Phys.* 92 (6), 2007: 609–20. – 18. Gaestel M.: Biological monitoring of non-thermal effects of mobile phone radiation: recent approaches and challenges. *Biol. Rev.* 85, 3, 2010: 489–500. – 19. Maskey D., Kim M., Aryal B. et al.: Effect of 835 MHz radiofrequency radiation exposure on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain. *Brain Res.* 8, 1313, 2010: 232–41. – 20. Pall M. L.: Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. *J. Cell Mol. Med.* 17 (8), 2013: 958–65. – 21. Kim J. Y., Hong S. Y., Lee Y. M. et al.: In vitro assessment of clastogenicity of mobile-phone radiation (835 MHz) using the alkaline comet assay and chromosomal aberration test. *Environ. Toxicol.* 23 (3), 2008: 319–27. – 22. Del Vecchio G., Giuliani A., Fernandez M. et al.: Continuous exposure to 900MHz GSM-modulated EMF alters morphological maturation of neural cells. *Neurosci. Lett.* 455 (3), 2009: 173–7. – 23. Goldworthy A.: The biological effects of weak electromagnetic fields; Problems & Solutions, Part 1, MCSA News, 7, 2012: 1–18. – 24. Koivisto M., Revonsuo A., Krause Ch. et al.: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *NeuroReport* 11, 27, 2000: 1–3. – 25. Ozgur E., Gler G., Seyhan N.: Mobile phone radiation induced free radical damage in the liver is inhibited by the antioxidants n-acetyl cysteine and epigallocatechin-gallate. *Internat. J. Radiat. Biol.* 86, 11, 2010: 935–945. – 26. Aitken R. J., Bennetts L. E., Sawyer D. et al.: Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *Int. J. Androl.* 28 (3), 2005: 171–9. – 27. Erogul O. I., Oztas E., Yildirim I. et al.: Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Arch. Med. Res.* 37 (7), 2006: 840–3. – 28. Agarwal A., Desai N. R., Makker K. et al.: Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study. *Fertil. Steril.* 92 (4), 2009: 1318–25. – 29. De Iulius G. N., Newey R. J., King B. V. et al.: Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One.* 31, 4 (7), 2009: e6446. – 30. Desai N. R., Kesari K. K., Agarwal A.: Pathophysiology of cell phone radiation: oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 22, 7, 2009: 114. – 31. Kesari K. K., Behari J.: Microwave exposure affecting reproductive system in male rats. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 162 (2), 2010: 416–28. – 32. Dasgud S., Taş M., Akdag M. Z. et al.: Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions. *Electromag. Biol. Med.* 2014 Jan 24. [Epub ahead of print]. – 33. Shahin S., Mishra V., Singh S. P. et al.: 2.45-GHz microwave irradiation adversely affects reproductive function in male mouse, *Mus musculus* by inducing oxidative and nitrosative stress. *Free Radic Res.* 2014 Feb 25. [Epub ahead of print]. – 34. Scaiano J. C., Mohtat N., Cozens F. L. et al.: Application of the radical pair mechanism to free radical in organized systems: can the effects of 60 Hz be predicted from studies under static fields? *Bioelectromagnetics.* 15, 6, 1994: 549–554. – 35. Repacholi M. H., Greenebaum B.: Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics* 20, 3, 1999: 133–160. – 36. Jajte J., Grzegorzczak J., Zmyslacuta M. et al.: Effect of 7 mT static magnetic field and iron ions on rat lymphocytes apoptosis, necrosis and free radical processes. *Bioelectrochemistry.* 57, 2, 2002: 107–111. – 37. Akdag M. Z., Bilgin M. H., Dasdag S. et al.: Alteration of nitric oxide production in rats exposed to a prolonged, extremely low-frequency magnetic field. *Electromagnetic Biol. Med.* 26, 2, 2007: 99–106. – 38. Simkó M.: Cell type specific redox status is responsible for diverse electromagnetic field effects. *Curr. Med. Chem.* 14, 10, 2007: 1141–1152. – 39. Kovacic P., Somanathan R.: Electromagnetic fields: mechanism, cell signaling, other bioprocesses, toxicity, radicals, antioxidants and beneficial effects. *J. Receptors Signal Transduc.* 30, 4, 2010: 214–226. – 40. Lee B. C., John H. M., Lim J. K. et al.: Effects of extremely low frequency magnetic field on the antioxidant defense system in mouse brain a chemiluminescence study. *J. Photochem. Photobiol. B.* 73, 1–2, 2004: 43–48. – 41. Jelenković A., Janac B., Pešić V. et al.: Effects of extremely low frequency magnetic field in the brain of rats. *Brain Res. Bull.* 68, 5, 2006: 355–360. – 42. Di Loreto S., Falone S., Caracciolo V. et al.: Fifty hertz extremely low-frequency magnetic field exposure elicits redox and trophic re-

sponse in rat-cortical neurons. *J. Cell. Physiol.* 219, 2, 2009: 334–343. – 43. Akdag M. Z., Dasdag S., Ulukaya E. et al.: Effects of extremely low frequency magnetic field on caspase activities and oxidative stress values in rat brain. *Biol. Trace Element Res.* 138, 1–3, 2010: 238–249. – 44. Chu L. Y., Lee J. H., Nam Y. S. et al.: Extremely low frequency magnetic field induces oxidative stress in mouse cerebellum. *General Physiol. Biophysics.* 30, 4, 2011: 415–421. – 45. Ciejka E., Kleniewska P., Goraca A. et al.: Effects of extremely low frequency magnetic field on oxidative balance in brain of rats. *J. Physiol. Pharmacol.* 62, 6, 2011: 657–661. – 46. Martínez-Samano J., Tores-Durán P. V., Juárez-Oropeza M. A. et al.: Effects of acute extremely low frequency electromagnetic field exposure on the antioxidant status and lipid levels in rat brain. *Arch. Med. Res.* 43, 3, 2012: 183–189. – 47. Krause C. M., Sillanmäki L., Koivisto M. et al.: Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the electroencephalogram during a visual working memory task. *Int. J. Radiat. Biol.* 76, 12, 2000: 1659–67. – 48. Huber R., Schuderer J., Graf T. et al.: Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate. *Bioelectromagnetics.* 24 (4), 2003: 262–76. – 49. López-Martín E., Relova-Quinteiro J. L., Gallego-Gómez R. et al.: GSM radiation triggers seizures and increases cerebral c-Fos positivity in rats pretreated with subconvulsive doses of picrotoxin. *Neurosci. Lett.* 398 (1–2), 2006: 139–44. – 50. Hossmann K. A., Hermann D. M.: Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. *Bioelectromagnetics.* 24, 1, 2003: 49–62. – 51. Garajz-Vrhovac V., Gajski G., Pažanin S. et al.: Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 214 (1), 2011: 59–65. – 52. Mauss-et-Bonnefont A. L., Hirbec H., Bonnefont X. et al.: Acute exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields induces glial reactivity and biochemical modifications in the rat brain. *Neurobiol. Dis.* 17 (3), 2004: 445–54. – 53. Wang Q., Cao Z., Bai X.: Effect of 900MHz electromagnetic fields on energy metabolism of cerebral cortical neurons in postnatal rat. *Wei Sheng Yan Jiu.* 33 (4), 2004: 428–32. – 54. Brillaud E., Piotrowski A., de Seze R.: Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study. *Toxicol.* 238 (1), 2007: 23–33. – 55. Tök L., Nazıroğlu M., Doğan S.: Effects of melatonin on Wi-Fi-induced oxidative stress in lens of rats. *Indian J. Ophthalmol.* 62 (1), 2014: 12–5. – 56. Labrèche F., Goldberg M. S., Valois M. F. et al.: Occupational exposures to extremely low frequency magnetic fields and postmenopausal breast cancer. *Am. J. Ind. Med.* 44 (6), 2003: 643–52. – 57. Schoenfeld E. R., O’Leary E. S., Henderson K. et al.: Electromagnetic fields and breast cancer on Long Island: a case-control study. *Am. J. Epidemiol.* 158 (1), 2003: 47–58. – 58. Yakymenko I., Sidorik E.: Risks of carcinogenesis from electromagnetic radiation of mobile telephony devices. *Exp. Oncol.* 32, 2, 2010: 54–60. – 59. de Vocht F.: Adult cancers near high-voltage power lines. *Epidemiol.* 24 (5), 2013: 782. – 60. Hardell L., Carlberg M., Söderqvist F. et al.: Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use. *Int. J. Oncol.* 43 (6), 2013: 1833–45. – 61. Herbert M. R., Sage C.: Autism and EMF? Plausibility of a pathophysiological link part II. *Pathophysiol.* 20 (3), 2013: 211–34. – 62. Sobel E., Davanipour Z.: Electromagnetic field exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer’s disease. *Neurol.* 47, 6, 1996: 1594–1600. – 63. Jiang D. P. I., Li J., Zhang J. et al.: Electromagnetic pulse exposure induces overexpression of beta amyloid protein in rats. *Arch. Med. Res.* 44 (3), 2013: 178–84. – 64. Salford L. G., Brun A. E., Eberhardt J. L. et al.: Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ. Health Perspect.* 111 (7), 2003: 881–883. – 65. Nittby H., Grafström G., Eberhardt J. L. et al.: Radiofrequency and extremely low-frequency electromagnetic field effects on the blood-brain barrier. *Electromagn. Biol. Med.* 27 (2), 2008: 103–26. – 66. Sirav B. I., Seyhan N.: Effects of radiofrequency radiation exposure on blood-brain barrier permeability in male and female rats. *Electromagn. Biol. Med.* 30 (4), 2011: 253–60. – 67. Arndash G. W., Mori T. et al.: Electromagnetic treatment to old Alzheimer’s mice reverses β -amyloid deposition, modifies cerebral blood flow, and provides selected cognitive benefit. *PLoS One* 7, 4, 2012: Article ID e35751. – 68. Banaceur S. I., Banas S., Sakly M. et al.: Whole body exposure to 2.4 GHz WIFI signals: effects on cognitive impairment in adult triple transgenic mouse models of Alzheimer’s disease (3xTg-AD). *Behav. Brain Res.* 240, 2013: 197–201. – 69. Terro F., Magnaudeix A., Crochetet M.: GSM-900 MHz at low dose temperature-dependently downregulates α -synuclein in cultured cerebral cells independently of chaperone-mediated-autophagy. *Toxicol.* 292, 2–3, 2012: 136–144. – 70. Cantello R., Tarletti R., Civardi C.: Transcranial magnetic stimulation and Parkinson’s disease. *Brain Res. Rev.* 38, 3, 2002: 309–327. – 71. Pierantozzi M., Palmieri M. G., Mazzone P. et al.: Deep brain stimulation of both subthalamic nucleus and internal globus pallidus restores intracortical inhi-

bition in Parkinson's disease paralleling apomorphine effects a paired magnetic stimulation study. *Clin. Neurophysiol.* 113, 1, 2002: 108–113. – 72. Túnez I., Drucker-Colín R., Jimena I. et al.: Transcranial magnetic stimulation attenuates cell loss and oxidative damage in the striatum induced in the 3-nitropropionic model of Huntington's disease. *J. Neurochem.* 97, 3, 2006: 619–630. – 73. Túnez I., Montilla P., Munoz M. D. C. et al.: Effect of transcranial magnetic stimulation on oxidative stress induced by 3-nitropropionic and in cortical synaptosomes. *Neurosci. Res.* 36, 1, 2006: 91–95. – 74. Tasset I., Medina F. J., Jimena I. et al.: Neuroprotective effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on a Huntington's disease rat model: effects on neurotrophic factors and neuronal density. *Neurosci.* 209, 2012: 54–63. – 75. Davanipour Z., Tseng C. C., Lee P. J. et al.: A casecontrol study of occupational magnetic field exposure and Alzheimer's disease results from the California Alzheimer's disease results from the California Alzheimer's Disease Diagnosis and Treatment Centers. *BMC Neurol.* 7, 2007: article 13. – 76. Santibanez M., Bolumar F., García A. M.: Occupational risk factors in Alzheimer's disease a review assessing the quality of published epidemiological studies. *Occupational Environm. Med.* 64, 11, 2007: 723–732. – 77. Savitz D. A., Checkoway H., Loomis D. P.: Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. *Epidemiol.* 9, 4, 1998: 398–404. – 78. Johansen C.: Exposure to electromagnetic fields and risk of central nervous system disease in utility workers. *Epidemiol.* 11, 5, 2000: 539–543.

Adresa autora: F. V., Alej Svobody 76, 301 66 Plzeň