

doi: 10.4149/gpb_2023036

Žiarenie mobilných telefónov pôsobí genotoxicky a výrazne zosilňuje účinky gama žiarenia v ľudských bunkách

Dimitris J. Panagopoulos^{1,2,3}¹ Výskumné laboratórium Choremeion, ¹ pediatrická klinika, Lekárska fakulta, Národná a Kapodistrijská univerzita v Aténach, Grécko² Národné centrum pre vedecký výskum "Demokritos", Atény, Grécko³ Výskumné laboratórium EMF-Biophysics, Atény, Grécko

Abstrakt. Predtým som informoval o chromozomálnom poškodení lymfocytov ľudskej periférnej krvi (HPBL) vyvolanom: a) elektromagnetickými poľami (EMP)/elektromagnetickým žiarením (EMR) mobilnej telefónie (MT), b) vysokou dávkou kofeínu a c) kombináciou týchto dvoch stresorov. HPBL tých istých subjektov vystavených gama žiareniu v dávkach 0,1, 0,3 alebo 0,5 Gy vykazovali viac aberácií ako subjekty vystavené EMP MT alebo vysokej dávke kofeínu v závislosti od dávky. Keď boli bunky vystavené týmto dávkam gama žiarenia vopred vystavené jednej 15-minútovej expozícii MT EMF, počet aberácií sa zvýšil výrazne viac ako súčet počtu aberácií vyvolaných jednotlivými stresormi u všetkých subjektov. Expozícia MT EMF s výkonovou hustotou ~ 136-krát nižšou, ako je najnovší expozičný limit Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP), teda okrem toho, že je sama o sebe genotoxická, výrazne zvýšila genotoxické pôsobenie gama žiarenia. Keďže gama žiarenie v podobných dávkach sa používa na diagnostické a terapeutické účely, ľudia by si mali byť vedomí zvýšeného rizika počas obdobia liečby. Z porovnania genotoxického pôsobenia MT EMF a gama žiarenia vyplýva, že limity ICNIRP sú minimálne ~4, 5×10^4 -krát menej prísne ako limity pre gama žiarenie.

Kľúčové slová: Elektromagnetické polia - žiarenie mobilných telefónov - gama žiarenie - ľudské lymfocyty - chromatidové aberácie - poškodenie DNA

Skratky: IARC, Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny; ICNIRP, Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením; IFO, iónové vynútené kmitanie; LTE, UMTS Long-Term Evolution; M, mitóza; MIMO, viacnásobný vstup a viacnásobný výstup; CW, kontinuálne vlny; DECT, digitálne vylepšené bezdrôtové telekomunikácie; ELF, extrémne nízka frekvencia; EMF, elektromagnetické pole; EMR, elektromagnetické žiarenie; GSM, globálny systém mobilných telekomunikácií; HPBL, lymfocyty ľudskej periférnej krvi; MT, mobilná telefónia; NR, nové rádio; OS, oxidačný stres; PHA, fytohemaglutinín; RF, rádiová frekvencia; ROS, reaktívne formy kyslíka; S, syntéza; SAR, špecifická miera absorpcie; SSB, bloky synchronizačného signálu; ULF, ultranízka frekvencia; UMTS, univerzálny mobilný telekomunikačný systém; UV, ultrafialové žiarenie; VGIC, napäťovo riadený iónový kanál; WC, bezdrôtová komunikácia; Wi-Fi, bezdrôtová vernosť; 2G/3G/4G/5G, druhá/tretia/štvrtá/päť generácia MT/WC.

Korešpondencia: Panagopoulos, Choremeion Research Laboratory, ^{1st} Paediatric Clinic, Medical School, National and Kapodistrian University of Athens, 11527 Athens, Greece
E-mail: dpanagop@biol.uoa.gr

© Autori 2024. Toto je článok s **otvoreným prístupom** podľa podmienok medzinárodnej licencie Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), ktorá umožňuje nekomerčné použitie, šírenie a reprodukciu na akomkoľvek médiu za predpokladu, že pôvodné dielo je riadne citované.

Úvod

Elektromagnetické polia bezdrôtovej komunikácie a účinky na zdravie

Odborná literatúra už obsahuje veľké množstvo štúdií o nepriaznivých účinkoch antropogénnych elektromagnetických polí (EMP), najmä tých, ktoré sa používajú v modernej bezdrôtovej komunikácii (WC) vrátane zariadení mobilnej telefónie (MT) a základňových antén, bezdrôtových domácich telefónov nazývaných digitálne vylepšené bezdrôtové telefóny (DECT), smerovačov internetového pripojenia nazývaných Wireless Fidelity (Wi-Fi), bezdrôtových pripojení "modrý zub" medzi elektronickými zariadeniami atď. Všetky WC EMF vždy kombinujú rádiofrekvenčné (RF)/mikrovlnné nosné vlny (vo väčšine prípadov rádovo GHz) s moduláciou a pulzáciou extrémne nízkych frekvencií (ELF) (3 - 3 000 Hz). Pulzácia sa používa na zvýšenie množstva rôznych prenášaných informácií (reč, text, obrázky, video, internet atď.) a počtu používateľov komunikujúcich súčasne s tou istou anténou a vykonávajúcich rôzne úlohy (tzv. multiplexovanie). Okrem toho všetky signály WC vykazujú náhodnú premenlivosť hlavne v pásme ultranízkych frekvencií (ULF) (0 - 3 Hz) (Panagopoulos et al. 2022a). Existuje dostatok dôkazov o tom, že najbiologickejšími zložkami komplexných signálov WC sú zložky ELF/ULF modulácie, pulzácie a variability (Markkanen et al. 2004; Mansourian et al. 2020; Panagopoulos et al. 2022a).

Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) klasifikovala VF (v skutočnosti WC) aj čisté ELF EMP ako pravdepodobne karcinogénne pre ľudí (skupina 2B) (IARC 2002, 2013; Baan et al. 2011). Na základe novších vedeckých dôkazov po klasifikácii VF EMP agentúrou IARC v roku 2011 viaceré štúdie navrhli, aby sa VF (v skutočnosti WC) EMP prehodnotili a klasifikovali ako pravdepodobne karcinogénne (skupina 2A) alebo karcinogénne (skupina 1) pre ľudí (Yakymenko et al. 2011, 2016, 2018; Hardell et al. 2013; Carlberg a Hardell 2017; Hardell 2017, 2019; Miller et al. 2018, 2019; Panagopoulos 2019a, 2019b, 2020; Hardell a Carlberg 2020; Hardell a Nyberg 2020; Panagopoulos et al. 2022b; Yakymenko a Tsibulin 2022a, 2022b). Okrem toho sa ukázalo, že väčšina štúdií vykonaných so simulovanými WC EMP s pevne stanovenými parametrami vyžarovanými generátormi (podľa odporúčaní IARC) hrubo podhodnocuje biologickú aktivitu skutočného vysoko variabilného vystavenia WC EMP komerčne dostupnými zariadeniami a anténami (Panagopoulos et al. 2015a, 2022a; Leach et al. 2018; Panagopoulos 2019a, 2019b, 2020; Kostoff et al. 2020; McCredden et al. 2022, 2023).

Univerzálny mobilný telekomunikačný systém (UMTS), používaný v tretej a štvrtjej generácii (3G a 4G) MT/ WC EMP/elektromagnetické žiarenie (EMR) vyžarované

komerčne dostupných mobilných telefónov a základňových antén, je bežným typom moderných MT/WC EMP/EMR. Zatiaľ čo 2G globálny systém pre mobilné telekomunikácie (GSM) sa stále používa a 4G - kombinácia UMTS alebo GSM pre hlasové služby a vylepšenie UMTS s nosnou frekvenciou do 2,6 GHz pre širokopásmový prístup na internet s názvom UMTS Long-Term Evolution (LTE) - je dnes najrozšírenejší, inštalácia systému 5G MT/WC telekomunikačným priemyslom s názvom New Radio (NR) je v plnom prúde. Ten zahŕňa okrem už existujúcich nosných frekvencií aj ešte vyššie (až do 100 GHz), ďalšie ELF pulzácie nazývané synchronizačné signálne bloky (SSB), viacprúdové vysielanie nazývané "multiple input multiple output" (MIMO), anténne sústavy pre smerové lúče s potenciálne zvýšenou intenzitou a oveľa hustejšiu sieť základňových antén s potenciálne zvýšeným výkonom s cieľom kompenzovať straty rozptylu energie spôsobené vyššími nosnými frekvenciami (Sesia et al. 2011; Dahlman et al. 2018; Hardell a Carlberg 2020; Hardell a Nyberg 2020; Kostoff et al. 2020; Panagopoulos et al. 2022a; Betta et al. 2023). Mnohí odborníci na biologické/zdravotné účinky EMP vyjadrili silné námietky voči zavedeniu 5G s obavami z vysoko zvýšeného zdravotného rizika na základe uvedených rozdielov oproti predchádzajúcim systémom MT/WC (McClelland a Jaboin 2018; Miller a kol. 2018, 2019; Panagopoulos 2019a, 2019b, 2020, 2023; Hardell a Carlberg 2020; Hardell a Nyberg 2020; Kostoff a kol. 2020; Balmori 2022; Jagetia 2022; McCredden a kol. 2022, 2023; Miller 2022; Yakymenko a Tsibulin 2022a, 2022b). Títo vedci žiadali moratórium na zavádzanie 5G a naliehavé uplatnenie princípu predbežnej opatrnosti (Read a O'Riordan 2017).

V mnohých štúdiách sa uvádzajú genotoxické účinky VF/mikrovlnných (v skutočnosti WC) aj čistých ELF EMP na rôzne organizmy a typy buniek/tkanív (pozri prehľady v Phillips et al. 2009; Panagopoulos 2019b, 2023; Lai 2021; Jagetia 2022). Genetické poškodenie je sprevádzané oxidačným stresom (OS) v dôsledku tvorby reaktívnych foriem kyslíka (ROS) a najnovšie údaje poukazujú na to, že v skutočnosti je genetické poškodenie spôsobené OS v bunkách (Yakymenko et al. 2016; Panagopoulos et al. 2021; Yakymenko a Tsibulin 2022b). Dlhodobé štúdie karcinogenity na zvieratách nedávno ukázali, že u hlodavcov vystavených simulovaným EMP 2G alebo 3G MT sa vyvinula rakovina mozgu a srdca sprevádzaná výrazne zvýšeným poškodením DNA (zlomy vlákien) v mozgoch vystavených zvierat (Falcioni et al. 2018; NTP 2018; Melnick 2019; Smith-Roe et al. 2020), čo potvrdzuje skutočnosť, že poškodenie DNA je hlavnou príčinou rakoviny vyvolanej životným prostredím. V dvoch štúdiách, ktoré porovnávali biologickú aktivitu medzi 2G a 3G MT EMP/žiarením vyžarovaným aktívnym mobilným telefónom, sa zistilo, že oba typy MT EMP vyvolali poškodenie DNA a histologické zmeny na vyvíjajúcej sa pečeni a mozgu embryí kurčiat, pričom 3G

(UMTS), ktoré sú dokonca genotoxickejšie/bioaktívnejšie ako 2G (GSM) (D'Silva et al. 2017, 2021).

žiarenia pre obyvateľstvo sa udávajú v podobe "efektívneho

Gama a iné druhy ionizujúceho žiarenia

Zatiaľ čo antropogénne ELF a RF (v skutočnosti WC) EMP sú kategorizované ako neionizujúce a klasifikované IARC (2002, 2013) ako "pravdepodobne karcinogénne" (skupina 2B), karcinogénne/smrteľné účinky rádioaktivity (alfa častice, ktoré sú vysokoenergetickými jadrami hélia ${}^4\text{He}^{2+}$ pozostávajúcimi z dvoch protónov

a dva neutróny, beta častice, ktoré sú vysokoenergetickými elektrónmi, a gama žiarenie, ktoré pozostáva z vysokoenergetických fotónov) (Klimov 1975; Burcham a Jones 1995; Prasad 1995), bolo rozpoznané čoskoro po jeho objavení v roku 1896, keď na rakovinu zomreli priekopníci vedy, ktorí v tom čase nepoznali jeho nebezpečenstvo (Hall a Giaccia 2006). Rádioaktivita sa vyžaruje nestabilnými jadrami prirodzene existujúcich atómov (ako ${}^{235}\text{U}$, ${}^{226}\text{Ra}$ atď.) a po začiatku 30. rokov 20. storočia ho vyžarujú aj

umelé rádionuklidy vznikajúce v urýchľovačoch atómových častíc pri vysokoenergetických zrážkach alebo v jadrových reaktoroch (Klimov 1975; Burcham a Jones 1995). Okrem alfa, beta a gama žiarenia sú formami rádioaktivity aj vysokoenergetické neutróny a protóny a röntgenové žiarenie a dokonca aj ultrafialové žiarenie (UV) (v menšej miere) sú tiež formami ionizujúceho EMR. A napokon kozmické ionizujúce žiarenie pozostáva z rôznych typov ionizujúcich častíc, ako sú mezóny, neutróny atď. a gama žiarenie. Kinetické energie ionizujúcich častíc, resp. energie fotónov gama žiarenia (≥ 1 MeV) sú zvyčajne rádovo niekoľko MeV a fotónov röntgenového žiarenia zvyčajne rádovo 1 - 100 keV, zatiaľ čo energie chemických väzieb medzi vonkajšími (valenčnými) elektrónmi a ich jadrami v atónoch/molekulách sú rádovo niekoľko eV. UV žiarenie je podstatne menej energetické ako röntgenové žiarenie s energiami približne 3 - 100 eV, ale stále je schopné v menšej miere spôsobiť ionizáciu. Všetky živé organizmy na Zemi sú neustále vystavené malým dávkam prírodného rádioaktívneho/ionizujúceho žiarenia kozmického/slniečného a pozemského pôvodu (Prasad 1995; Nias 1998).

IARC (2000) klasifikuje všetky druhy rádioaktivity a röntgenového žiarenia ako "karcinogénne" (skupina 1), hoci röntgenové žiarenie sa neustále používa na diagnostiku a gama žiarenie v značných dávkach (do ~ 1 Gy) sa používa aj na lekársku diagnostiku a terapeutickú liečbu rakoviny u pacientov (Hall a Giaccia 2006). Ich pôsobenie v akomkoľvek absorpčnom prostredí vrátane biologického tkaniva spočíva stručne povedané v tom, že vysokoenergetické častice (alfa, beta, neutróny atď.) alebo fotóny (gama, x a dokonca UV) môžu ľahko rozbíjať chemické väzby a ionizovať atómy/molekuly exponovaných materiálov (Prasad 1995; Nias 1998). Zavedenou metrikou absorpcie ionizujúceho žiarenia živým tkanivom je "absorbovaná dávka" (v Gy alebo mGy) definovaná ako množstvo energie absorbovanej jednotkou hmotnosti tkaniva (1 Gy = 1 J/kg).

Limity vystavenia akémukoľvek druhu ionizujúceho

dávka" za rok, a to 1 mSv/rok, ale dávky z lekárskeho ožiarenia a prírodného rádioaktívneho pozadia sú z tohto limitu vylúčené. Zdá sa, že v literatúre chýba aj zodpovedajúci limit pre akútne ožiarenie. Akútne ožiarenie určitou dávkou je zvyčajne oveľa škodlivejšie ako ožiarenie rovnakou celkovou dávkou v mnohých frakciách a umožnenie zotavenia organizmu v časových intervaloch medzi jednotlivými frakciami (Prasad 1995; Nias 1998; Hall a Giaccia 2006; IAEA 2011).

Efektívna dávka (v Sv alebo mSv) pre konkrétny typ tkaniva a pre konkrétny typ ionizujúceho žiarenia sa rovná súčinu absorbovanej dávky (v Gy alebo mGy) a účinnosti konkrétneho typu ionizujúceho žiarenia (tzv. žiarenia

váhový faktor - w_R) a tiež vynásobený citlivosťou konkrétneho tkaniva, ktoré absorbuje žiarenie (tzv. tkanivový váhový faktor - w_T) (Prasad 1995; Nias 1998; Hall a Giaccia 2006). Teda:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times w_R \times w_T \quad (1)$$

Lymfocyty ľudskej periférnej krvi a hlásené genotoxické účinky

Lymfocyty z ľudskej periférnej krvi (HPBL) prirodzene zastavené vo fáze G_0 a zvyčajne stimulované na mitózu (M) - boli vytvorené ako modelový biologický systém na hodnotenie genotoxicity rôznych faktorov životného prostredia, ako sú ionizujúce žiarenie, chemické látky, fajčenie, liečivá. Zatiaľ čo účinky ionizujúceho žiarenia na HPBL sú intenzívne a dobre známe už desaťročia, vrátane všetkých typov chromozomálnych aberácií v závislosti od dávky (IAEA 2011), bolo vykonaných niekoľko štúdií na hľadanie účinkov WC EMP na HPBL, a to *in vitro* aj *in vivo*. Vo väčšine týchto štúdií sa zistili genotoxické účinky vyvolané samotnými WC EMP alebo v kombinácii s inými genotoxickými látkami. Prehľad takýchto štúdií možno nájsť v publikácii Panagopoulos (2019a, 2020, 2022a). V jednej z týchto štúdií sa zistili zlomy vlákien DNA a chromozomálne aberácie vyvolané EMP podobnými UMTS MT v stupňoch zvyšujúcich sa s dlhším trvaním expozície. Tieto účinky sa pripisovali OS vyvolanému vystavením EMP (El-Abd a Eltoweissy 2012). V staršej štúdií (Ji et al. 2004) boli dobrovoľníci vystavení *in vivo* rozprávaniu prostredníctvom mobilných telefónov GSM (2G) počas 4 hodín. Po expozícii sa poškodenie DNA v ich krvných vzorkách výrazne zvýšilo v porovnaní s ich krvnými vzorkami pred expozíciou. V dvoch novších štúdiách sa skúmali HPBL u ľudí, ktorí sa zdržiavali v blízkosti základňových staníc MT/WC a boli tak *vystavení in vivo* skutočným EMP/EMR MT/WC vyžarovaným základňovými anténami. V oboch štúdiách Gulati et al. (2016) a Zothansiana et al. (2017) sa zistilo výrazne zvýšené genetické poškodenie v porovnaní s kontrolnými skupinami, ktoré sa zdržiavali vo väčších vzdialenostiach od antén/telefónnych veží.

Citlivým testom na zaznamenanie genotoxických účinkov environmentálnych stresorov na HPBL je tzv. Ten umožňuje pozorovať v metafáze neopravené poškodenia DNA vyvolané počas G₂ alebo včasnej M fázy a premenené počas M fázy na aberácie chromatidového typu v bunkách aktivovaných na mitózu (Terzoudi a Pantelias 2006; Pantelias a Terzoudi 2010, 2011; Terzoudi et al. 2011; Panagopoulos 2019a, 2020). Dôvod zvýšenej citlivosti G₂ fázy mitotického cyklu súvisí s existenciou kontrolného bodu, ktorý je spolu s ďalším známym kontrolným bodom na konci G₁ fázy najcitlivejšou fázou bunkového cyklu (Pantelias a Terzoudi 2011).

Nedávno som uviedol, že 15-minútové jednorazové vystavenie lymfocytov periférnej krvi človeka EMP UMTS vysielanému komerčne dostupným mobilným ("inteligentným") telefónom počas aktívneho telefonického hovoru v režime "hovor" vo vzdialenosti 1 cm od krvných vzoriek vyvolalo chromatidové zlomy (terminálne delécie) a chromatidové medzery (achromatické zmeny) vo veľmi významných percentách (až +275 %) v porovnaní so vzorkami vystavenými falošnej expozícii (kontrola) u všetkých šiestich testovaných zdravých osôb. Funkcie Wi-Fi a Bluetooth boli v zariadení vypnuté. Lymfocyty boli stimulované, aby vstúpili

mitotického cyklu. Tie, ktoré boli vystavené počas fázy G₂ alebo na začiatku M, boli zastavené v metafáze ošetrovaním kolcemidom a pozorované svetelnou mikroskopiou (Panagopoulos 2019a). Nedávno som uviedol, že počet chromatidových aberácií vyvolaných expozíciou EMP mobilného telefónu bol porovnateľný a dokonca väčší ako počet chromatidových aberácií vyvolaných extrémnou dávkou kofeínu ~290-krát vyššou, ako je povolená jedinej dávky kofeínu pre dospelého jedinca a že kombinácia tejto dávky kofeínu s expozíciou mobilnému telefónu zvýšila počet aberácií u tých istých subjektov výrazne viac ako súčet jednotlivých účinkov vyvolaných každým stresorom samostatne (Panagopoulos 2020).

Kombinácia WC EMP s ionizujúcim žiarením. Cieľ štúdie

Porovnanie biologických účinkov WC EMP s účinkami iných genotoxických látok, ako je gama žiarenie alebo vysoká dávka kofeínu v mojej predchádzajúcej publikácii s HPBL, a skúmanie kombinovaných účinkov je veľmi dôležité, pretože ľudia sú dnes vo väčšine prípadov vystavení kombinovaným stresovým faktorom, pričom jedným z nich sú WC EMP. Viaceré štúdie už porovnávali účinky alebo skúmali kombináciu vystavenia WC EMP s rádioaktivitou/ionizujúcim žiarením. Väčšina z nich zistila synergické účinky v rôznych biologických systémoch.

V jednej štúdii boli kvasinkové bunky vystavené kontinuálnemu (CW) alebo pulznému RF EMP (rovnaká RF frekvencia a amplitúda, ale v pulzoch s opakovacou frekvenciou 217 Hz ako v GSM MT), v oboch prípadoch v kombinácii alebo bez kombinácie s UV žiarením, a skúmala sa indukcia bunkovej smrti. Na stránke

štúdia zistila, že pulzné RF EMP (s 217 Hz GSM pulzmi) významne zvýšilo bunkovú smrť vyvolanú UV žiarením, zatiaľ čo CW RF EMP takéto zvýšenie nespôsobilo (Markkanen et al. 2004). V inej štúdii sa zistilo, že simulované vystavenie EMP UMTS zvýšilo chromozomálne poškodenie vyvolané röntgenovým žiarením v HPBL (Manti et al. 2008). V inej štúdii sa skúmal kombinovaný účinok vystavenia EMP mobilného telefónu GSM 900 (2G) a gama žiarenia na bunky ľudskej gliómovej bunkovej línie (SHG44) a zistilo sa, že predbežné vystavenie EMP MT 2G významne zvýšilo pokles miery proliferácie buniek a zvýšenú mieru apoptózy vyvolanú vystavením gama žiarenia a viedlo k synergickému účinku v y v o l a n í m stresovej reakcie a OS v bunkách (Cao et al. 2009). V inej štúdii sa porovnávali genotoxické účinky medzi žiarením alfa častíc plutónia 239 (nominálna aktivácia $3,0 \times 10^4$ Bq) a 2G (GSM 900) EMP z komerčne dostupného mobilného telefónu na *Allium cepa* novovzniknuté korene. Štúdia zistila veľmi intenzívne genotoxické účinky (mitotické abnormality, chromozómové aberácie, mikrojadrá atď.) vyvolané 2G MT EMF a zvyšujúce sa s dlhším trvaním expozície, hoci boli podľa očakávania menej intenzívne ako zodpovedajúce účinky alfa rádioaktivity, ktorá je známym ľudským karcinogénom (Pesnya a Romanovsky 2013). V nedávnej štúdii sa zistilo, že súčasné vystavenie EMP Wi-Fi a gama žiarenia počas 72 h zvýšilo počet dvojlákových zlomov DNA v lymfocytoch periférnej krvi potkanov (Khodamoradi a kol. 2022). V novej štúdii sa skúmal kombinovaný účinok UV žiarenia a EMP Wi-Fi pri vyvolávaní zápalu v ľudských kožných bunkách hodnotený na základe zvýšenia koncentrácií cytokínov a zistilo sa, že expozícia Wi-Fi pozorovateľne, ale nie významne, ďalej zvýšila koncentrácie cytokínov, ktoré už boli zvýšené predchádzajúcou expozíciou UV žiarenia (Szilágyi et al. 2023). V iných štúdiách sa nezistil synergický účinok medzi expozíciou RF/WC EMP a ionizujúcim žiarením (Maes et al. 2000; Stronati et al. 2006; Juutilainen et al. 2007).

Cieľom tejto štúdie bolo porovnať genotoxicitu UMTS (3G/4G) MT/WC EMP/EMR, popísanú v mojich predchádzajúcich správach (Panagopoulos 2019a, 2020), s genotoxicitou gama žiarenia v dávkach porovnateľných s dávkami používanými na účely diagnostiky a liečby rakoviny a otestovať genotoxicitu kombinácie týchto dvoch stresorov na HPBL tých istých subjektov a za rovnakých podmienok a experimentálnych postupov. Experimenty predostretej štúdie sa uskutočnili v rovnakom čase ako experimenty Panagopoulos (2019a, 2020), ale analýzy výsledkov sa vykonali oddelene a boli uverejnené v samostatných správach. Toto je tretia správa zaoberajúca sa porovnaním a kombináciou EMF UMTS MT s gama žiarením. Žiadna iná štúdia doteraz neporovnávala genotoxicitu ani neskúmala kombinovaný účinok gama žiarenia a

reálnej expozície 3G/4G MT EMF na HPBL, a preto je táto štúdia nová.

Materiály a metódy

Kultivácia krvi a rozdelenie na jednotlivé vzorky/skupiny

Po získaní súhlasu boli odobraté vzorky krvi od šiestich zdravých dospelých darcov nefajčiarov (jedna vzorka od jedného darcu v každom experimente) do heparinizovaných sklenených skúmaviek na analýzu citlivosti chromozómov na rôzne testované stresové faktory. Subjekty boli muži aj ženy, vo veku 28 - 42 rokov, s "miernym" používaním mobilných telefónov (nie viac ako ~ 30 min celkovej dennej konverzácie na mobilných telefónoch) a bez hlásených závažných ochorení v anamnéze alebo akejkoľvek pravidelnej medikácie. Okrem toho sa neriešili žiadne špecifické rozdiely medzi subjektmi, keďže každý subjekt mal svoju vlastnú kontrolnú vzorku. Vzorky plnej krvi boli kultivované v médiu RPMI 1640 (Biochrom AG, Nemecko) obsahujúcom 10 % fetálneho hovädzieho séra (FBS), 1 % L-glutamínu (2 mM) a 1 % antibiotík (penicilín: 100 U/ml; streptomycín: 100 µg/ml). Na stimuláciu lymfocytov sa pridalo 2 % fytohemaglutinínu (PHA) z konečného objemu média (rozpusteného vo vode v koncentrácii 0,24 mg/ml) (normálne zastavené vo fáze G0), aby vstúpili do mitotického cyklu (Panagopoulos 2019a, 2020).

Pre každý subjekt sa pripravila jedna kultúra v 200 ml banke (ktorá sa neskôr rozdelila na jednotlivé vzorky/skupiny), aby sa zabezpečili rovnaké podmienky kultivácie a liečby pre všetky jednotlivé vzorky/skupiny v každom experimente. Kultúra sa inkubovala 72 hodín pri 37 °C vo zvlhčenom inkubátore s obsahom 5 % CO₂ a 95 % vzduchu. Po 72 hodinách inkubácie sa jedna krvná kultúra rozdelená na jednotlivé vzorky/skupiny v rovnakých 30 ml obdĺžnikových plastových bankách. (Každá jednotlivá skupina obsahovala: 0,5 ml krvi, 5 ml kultivačného média, 100 µl PHA). Jedna vzorka bola vystavená EMP UMTS - samostatne po dobu 15 min a ďalšia bola vystavená falošnej expozícii, ako už bolo opísané (Panagopoulos 2019a). Ďalšie tri vzorky boli vystavené EMF UMTS a následne gama žiareniu 0,1, 0,3 a 0,5 Gy a ďalšie tri boli vystavené rovnakým dávkam gama žiarenia a fingovanej expozícii EMF UMTS počas 15 min.

Systémy vystavenia EMP a gama žiareniu

Expozícia EMP sa uskutočnila pomocou komerčne dostupného "inteligentného" mobilného telefónu UMTS (3G/4G) s cieľom otestovať účinky expozície v reálnom živote. Opis parametrov EMP UMTS (modulácia, pulzovanie atď.) nájdete v Panagopoulos (2019a, 2020). Hodnota špecifickej miery absorpcie (SAR) slúchadla pre ľudskú hlavu, ak-

podľa výrobcu bola 0,66 W/kg. Funkcie internetového pripojenia (dáta)/Wi-Fi a Bluetooth "inteligentného" telefónu boli vypnuté ako predtým (Panagopoulos 2019a, 2020).

Hustota výkonu v RF pásme vyžarovanom slúchadlom počas expozícií sa merala vo vzdialenosti 1 cm od slúchadla pomocou RF merača Cornet ED85EXpluss (Cornet Microsystems Inc., USA) a spektrálneho analyzátora Spectran HF-4040V3 (Aaronia AG, Nemecko), oba s anténou blízkeho poľa. Intenzita elektrického a magnetického poľa ELF (ELF-E a ELF-B) vyžarovaného slúchadlom sa merala vo vzdialenosti 1 cm pomocou spektrálneho analyzátora Spectran NF-1010E (Aaronia AG, Nemecko). Reprezentatívna priemerná špičková hustota výkonu (z piatich reprezentatívnych meraní špičkového okamihu bez pozadia) v pásme RF ± štandardná odchýlka (SD) bola $92 \pm 27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Priemerná hustota výkonu počas šiestich minút (ako je uvedené v usmerneniach vydaných podľa ICNIRP (1998; 2020) bola $29 \pm 14 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, čo je ~136-krát nižšia ako najnovší limit ICNIRP (2020) ($4000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$). Nosná frekvencia bola premenlivá ~1920-1960 MHz počas expozície. Reprezentatívne priemerné hodnoty ELF-E a ELF-B (z piatich reprezentatívnych okamžitých meraní s vylúčením pozadia) ± SD pri frekvencii 100 Hz boli $12 \pm 4,2 \text{ V/m}$, resp. $0,9 \pm 0,4 \text{ mG}$. Zodpovedajúce priemerné hodnoty ELF-E a ELF-B (z piatich okamžitých meraní s vylúčením pozadia) ± SD pri frekvencii 1500 Hz boli $8 \pm 4,6 \text{ V/m}$, resp. $0,06 \pm 0,02 \text{ mG}$ (Panagopoulos 2019a, 2020). Všetky merania sa vykonávali oddelene od expozícií, aby boli meracie zariadenia počas expozícií na rovnakom mieste so vzorkami.

Vzorky boli vystavené gama žiareniu v špeciálnej kovovej gama komore obsahujúcej ⁶⁰Co (GammaCell 220 irradiator, Atomic Energy of Canada Ltd.), Ottawa, Kanada) pri izbovej teplote. Absorbovaná dávka sa vyhodnotila pomocou elektrometra "Victoreen r-meter" 570A (Victoreen Instruments Co, Cleveland, Ohio, USA). Dávky gama žiarenia vybrané pre experimenty na štúdium ich účinkov samostatne alebo v kombinácii so žiarením mobilného telefónu boli 0,1, 0,3 a 0,5 Gy. Dĺžka expozície v gama komore zodpovedajúca týmto dávkam bola 18, 52 a 85 s.

Pre gama žiarenie $w_R = 1$ v rovnici 1 a $w_T = 1$ pre celotelovú absorpciu, čo je prípad cirkulujúcej krvi, ktorá absorbovala dávku (Hall a Giaccia 2006). Efektívne dávky zodpovedajúce 0,1, 0,3 a 0,5 Gy použité v týchto experimentoch sú teda 0,1, 0,3 a 0,5 Sv, čo je 100, 300 a 500-krát viac ako povolený ročný limit 1 mSv. Vzhľadom na to, že akýkoľvek

zodpovedajúca hranica pre akútnu dávku by mala byť aspoň desiatky krát menšia, mohli by sme veľmi konzervatívne usúdiť, že dávky použité v súčasných experimentoch boli aspoň ~1000, 3000 a 5000 krát vyššie ako rozumná prípustná akútna dávka pre gama žiarenie.

Postupy vystavenia gama žiareniu a mobilným telefónom

Konkrétne vzorky, ktoré mali byť vystavené žiareniu UMTS, samotnému alebo doplnkovému žiareniu gama, boli odobraté do "expozičnej miestnosti" a vystavené žiareniu UMTS mobilného telefónu na 15 minút vo vzdialenosti 1 cm od proximálnej steny banky počas aktívneho telefonického hovoru v režime "hovor" (Panagopoulos 2019a, 2020). Toto sa uskutočnilo v expozičnej miestnosti, aby kontroly (v kultivačnej miestnosti) neboli exponované. Po tom, ako sa všetky exponované vzorky vrátili do kultivačnej miestnosti, boli príslušné kontrolné (falošne exponované) vzorky tiež prenesené do expozičnej miestnosti na 15 min. na rovnaké miesto ako exponované vzorky, bez toho, aby boli vystavené MT EMF. Urobilo sa to preto, lebo pozadie ELF-E a ELF-B a svetelné podmienky v oboch miestnostiach neboli identické, ako už bolo vysvetlené (Panagopoulos 2019a, 2020).

Zvýšenie teploty vo vzorkách krvi počas 15-minútovej expozičnej nepresiahlo 0,1 °C, ako sa meralo v identickej kultúre a banke kalibrovaným elektronickým teplomerom HANNA Check-Temp 1 (USA).

Potom sa všetky vzorky krvi v rovnakých 30 ml plastových bankách preniesli do tepelne izolovaného boxu, v ktorom bola nainštalovaná špeciálna komora na ožarovanie gama žiarením. Vzorky, ktoré nemali byť vystavené gama žiareniu, boli umiestnené v miestnosti vedľa komory s rovnakou teplotou, ale bez gama žiarenia. Špecifické vzorky vystavené gama žiareniu boli prenesené do miestnosti s gama komorou a umiestnené do komory na určitý čas (s) zodpovedajúci špecifickým dávkam (0,1, 0,3 a 0,5 Gy) a potom boli umiestnené späť k ostatným vzorkám. Všetky vzorky boli teda vystavené rovnakým vplyvom prostredia okrem vystavenia gama žiareniu. Po skončení expozičnej gama žiarenia sa všetky vzorky preniesli späť do tepelne izolovaného boxu v "kultivačnej miestnosti" laboratória.

Zastavenie metafázy, fixácia a pozorovanie

Po ukončení expozičnej/expozičnej (~60 minút po rozdelení na jednotlivé vzorky) a vrátení všetkých exponovaných a falošne exponovaných vzoriek späť do kultivačnej miestnosti sa všetky jednotlivé skupiny/vzorky ošetrili kolcemidom (50 µl pridaných ku každej vzorke) na 60 minút, aby sa zastavili deliace sa bunky v metafáze. Kolcemid zabraňuje deliacim sa bunkám prejsť z metafázy do anafázy tým, že zabraňuje tvorbe atraktónu. Udržiavanie buniek v metafáze umožňuje, aby ich kondenzované chromozómy boli jasne pozorovateľné svetelnou mikroskopiou na prípadné aberácie. Trvanie ošetrovania kolcemidom (60 min) hneď po ukončení expozičnej/expozičnej hanby plus čas expozičnej/expozičnej hanby (spolu ~ 2 h) určuje, v ktorých fázach cyklu delenia buniek sa zastavené v metafáze

lymfocyty boli vystavené. V tomto prípade ~2-hodinové obdobie určuje, že bunky metafázy zozbierané na pozorovanie boli počas expozičnej/expozičnej normálne v strednej a neskoršej fáze G₂ alebo na začiatku M (profáza).

Bunky sa potom zozbierali centrifugáciou, 10 minút sa ošetrovali hypotonickým roztokom KCl 75 mM (Sigma-Aldrich, USA), fixovali sa v metanole: ľadovej kyseliny octovej (3:1 v/v) a 10 minút sa farbili 5% roztokom Giemsa (Merck, Nemecko), aby sa mohli pozorovať svetelnou mikroskopiou. Svetelná mikroskopia bola spojená so systémom analýzy obrazu (Ikaros MetaSystems, Nemecko), aby sa uľahčilo bodovanie.

Chromozomálne poškodenie sa hodnotilo podľa počtu chromatidových medzier (achromatických lézií) a chromatidových zlomov (terminálnych delcií) v bunkách v metafáze. Pre každú z 8 vyššie opísaných vzoriek každého subjektu sa 400 metafáz identicky spracovaných zo 4 rôznych sklíčok (100 buniek z každého sklíčka) slepo vyhodnotilo na chromatidové aberácie. Pre každého jedinca sa vypočítali priemerné hodnoty celkového počtu aberácií (medzier a zlomov) na bunku a SD vo všetkých vzorkách. Medzery sa hodnotili len vtedy, keď sa rozšírili na celú šírku chromatid. Aberácia sa považovala za zlom, keď šírka medzery bola rovnaká alebo väčšia ako šírka chromatidy.

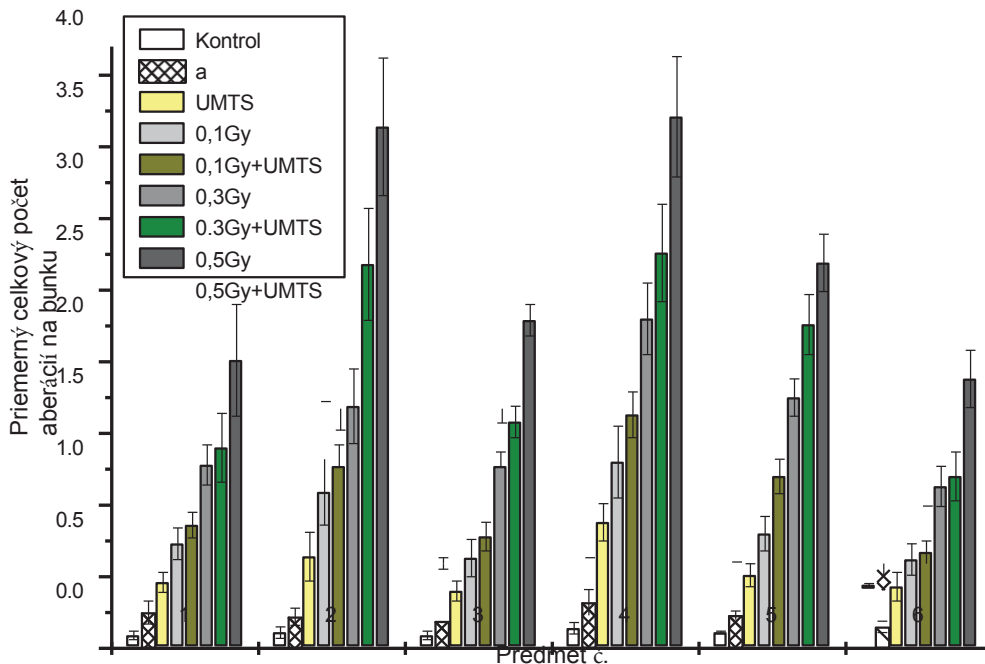
Štatistická analýza

Výsledky boli štatisticky analyzované použitím Studentovho t-testu pre nerovnaké rozptyly (program Microsoft Excel) medzi exponovanými a kontrolnými skupinami (vzorkami) alebo medzi rôzne exponovanými skupinami pre každého jednotlivca. Hodnoty p menšie ako 0,05, pre pravdepodobnosť, že rozdiely medzi skupinami sú spôsobené náhodnými odchýlkami, boli prijaté ako štatisticky významné.

Výsledky

Výsledky experimentov s HPBL šiestich zdravých osôb (č. 1-6) sú uvedené v tabuľke 1 a graficky znázornené na obrázku 1. Jediná 15-minútová expozičnej mobilným telefónom UMTS (3G/4G) počas telefonického hovoru v režime "hovor" vo vzdialenosti 1 cm zvýšila celkový počet chromozómových aberácií (chromatidové medzery a zlomy) o 100 - 275 % v porovnaní so vzorkami vystavenými falošnej expozičnej/kontrolnej, pričom prevažnú väčšinu aberácií tvorili medzery. Všetky vzorky vystavené UMTS sa významne líšili od príslušných kontrolných/šampaňských vzoriek (vo všetkých prípadoch $p < 0,03$), ako sa uvádza v Panagopoulos (2019a) a uvádza v tabuľke 1. Podľa očakávania vzorky, ktoré boli vystavené gama žiareniu, vykazovali významne väčší počet aberácií (chromatidové medzery aj zlomy) ako vzorky vystavené EMP UMTS a ešte významnejšie sa líšili, o 344 % - 2900 %, od zodpovedajúcich kon-

Poškodenie chromozómov spôsobené mobilným telefónom a gama žiarením



Obrázok 1. Priemerný celkový počet chromatidových aberácií (medzier a zlomov) na bunku \pm SD v 400 bunkách (lymfocyty periférnej krvi) každej skupiny (vzorka krvi) pre každého zo 6 subjektov (č. 1-6): vystavené falošnej expozícii (kontrola); vystavené UMTS 15 min (UMTS); vystavené gama žiareniu 0,1 Gy (0,1Gy); vystavené 0,1 Gy a UMTS 15 min (0,1Gy+UMTS); vystavené 0,3 Gy (0,3 Gy); vystavené 0,3 Gy a UMTS 15 min (0,3Gy+UMTS); vystavené 0,5 Gy (0,5Gy); vystavené 0,5 Gy a UMTS 15 min (0,5Gy+UMTS).

(vo všetkých prípadoch $p < 0,01$) (tab. 1, obr. 1). Hoci vo väčšine vzoriek vystavených samotnému gama žiareniu alebo v kombinácii s UMTS EMF bol počet medzier (achromatických lézií) stále vyšší ako počet zlomov (terminálnych delécií) (tabuľka 1), percento zlomov bolo výrazne vyššie ako vo vzorkách vystavených MT EMF a/alebo kofeínu (Panagopoulos 2019a, 2020). Genetické poškodenie vyvolané gama žiarením bolo závislé od dávky a zvyšovalo sa s rastúcimi dávkami od 0,1 do 0,5 Gy. Kombinovaná expozícia EMP UMTS a následne gama žiareniu zvýšila počet aberácií (medzier a zlomov) u všetkých subjektov významne viac ako expozícia len gama žiareniu (vo všetkých prípadoch $p < 0,05$) a významne viac ako súčet aberácií vyvolaných jednotlivými expozíciami (gama, UMTS) (tab. 1, obr. 1). Z toho jasne vyplýva, že živé tkanivo je zraniteľnejšie, ak je vystavené podmienkam kombinovaného stresu, ako keď je vystavené jednotlivým stresorom, a nepriaznivý účinok v prípade kombinovaného stresu je väčší ako súčet jednotlivých účinkov zo samostatných expozícií každému stresoru.

Na obrázku 2A je zobrazená metafáza kontrolnej (falošne exponovanej) vzorky krvi od subjektu č. 6 (muž). Toto je reprezentatívny obrázok metafázy z kontrolnej (zdanlivo exponovanej) vzorky/skupiny so všetkými 46 chromozómami neporušenými. Na obrázku 2B je zobrazená metafáza vzorky krvi toho istého subjektu, ktorý bol vystavený EMF UMTS MT (15 min) s

achromatická lézia jednej chromatidy - medzera (g). Obrázok 2C zobrazuje metafázu vzorky krvi toho istého subjektu (č. 6) vystaveného gama žiareniu 0,1 Gy s jednou chromatidovou terminálnou deléciou - zlomom (b) s posunutým fragmentom (kratšia šípka) smerom k protichromatide a jednou chromatidovou medzerou (g). Obrázok 2D ukazuje metafázu vzorky krvi toho istého subjektu, vystaveného gama žiareniu 0,1 Gy a UMTS MT EMF (15 min) s dvoma medzerami (g) a jedným zlomom (b). Obrázok 2E zobrazuje metafázu vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného gama žiareniu 0,3 Gy s dvoma zlomami (b) a jednou medzerou (g). Obrázok 2F zobrazuje metafázu vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného gama žiareniu 0,3 Gy a UMTS MT EMF (15 min) s dvoma medzerami (g) a dvoma prestávkami (b). Jeden zlom v pravej dolnej časti obrázka je s posunutým fragmentom (kratšia šípka) smerom k protichromatide a druhý v ľavej dolnej časti obrázka je izochromatidový zlom (zlom na rovnakom mieste v oboch chromatidách). [Izochromatidové (dvojité) aberácie sa počítajú ako jedna aberácia a považujú sa za vzniknuté počas fázy syntézy (S) bunkového cyklu. Zdá sa teda, že konkrétna bunka bola počas expozície vo fáze S a prešla do fázy M rýchlejšie ako väčšina ostatných buniek]. Na obrázku 2G je znázornená metafáza vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného gama žiareniu 0,5 Gy so štyrmi zlomami (b), z ktorých tri majú fragmenty posunuté smerom k protichromatidám (kratšie šípky) a jednu medzeru (g). Na obrázku 2H je znázornená metafáza krvi

Tabuľka 1. Chromatidové aberácie v ľudských lymfocytoch vyvolané mobilným telefónom UMTS a/alebo gama žiarením

Číslo subjektu (vek, pohlavie)	Skupiny (vzorky)	Medzer v y v 400 buniek	Prestávky v 400 buniek	Celkom v 400 buniek	Priemerný celkový Aberr. na bunku ±SD	Odchýlka od kontroly (%)	p-hodnota *	Odchýlka od gama (%)***	p-hodnota**
1 (42, muž)	Ovláda nie	30	5	35	0.09 ± 0.03	+178 +411			
	UMTS	84	17	101	0.25 ± 0.08	+711		+59	
	0,1 Gy	92	92	184	0.46 ± 0.07	+856	<0.02		
	0,1 Gy + UMTS	140	153	293	0.73 ± 0.11	+1322	<0.01	+49	<0.01
	0,3 Gy	165	181	346	0.86 ± 0.09	+1456	<0.01	+44	<0.01
	0,3 Gy + UMTS	271	241	512	1.28 ± 0.14	+2133	<0.01		
	0,5 Gy	275	286	561	1.40 ± 0.24	+100	<0.01		<0.05
0,5 Gy + UMTS	407	398	805	2.01 ± 0.39	+482	<0.01			
2 (33, žena)	Ovláda nie	37	7	44	0.11 ± 0.04	+891		+70	
	UMTS	70	19	89	0.22 ± 0.06	+1055	<0.03		
	0,1 Gy	143	113	256	0.64 ± 0.17	+1436	<0.01	+33	<0.03
	0,1 Gy + UMTS	257	179	436	1.09 ± 0.23	+2336	<0.01		
	0,3 Gy	269	240	509	1.27 ± 0.15	+3209	<0.01	+36	<0.04
	0,3 Gy + UMTS	325	302	627	1.69 ± 0.26		<0.01		
	0,5 Gy	591	436	1027	2.68 ± 0.39	+111	<0.01		<0.03
0,5 Gy + UMTS	733	724	1457	3.64 ± 0.48	+344	<0.01			
3 (28, muž)	Ovláda nie	28	9	37	0.09 ± 0.03	+600		+57	
	UMTS	63	15	78	0.19 ± 0.04	+767	<0.02		
	0,1 Gy	79	83	162	0.40 ± 0.07	+1311	<0.01	+63	<0.04
	0,1 Gy + UMTS	118	133	251	0.63 ± 0.13	+1656	<0.01		
	0,3 Gy	162	151	313	0.78 ± 0.10	+2444	<0.01	+45	<0.01
	0,3 Gy + UMTS	263	247	510	1.27 ± 0.10		<0.01		
	0,5 Gy	343	290	633	1.58 ± 0.11	+129	<0.01		<0.01
0,5 Gy + UMTS	451	464	915	2.29 ± 0.11	+529	<0.01			
4 (40, muž)	Ovláda nie	43	15	58	0.14 ± 0.04	+829		+48	
	UMTS	102	26	128	0.32 ± 0.09	+1064	<0.03		
	0,1 Gy	222	130	352	0.88 ± 0.13	+1543	<0.01	+41	<0.04
	0,1 Gy + UMTS	335	185	520	1.30 ± 0.25	+1871	<0.01		
	0,3 Gy	393	258	651	1.63 ± 0.16	+2550	<0.01	+34	<0.01
	0,3 Gy + UMTS	495	424	919	2.30 ± 0.25		<0.01		
	0,5 Gy	615	490	1105	2.76 ± 0.34	+109	<0.01		<0.02
0,5 Gy + UMTS	819	665	1484	3.71 ± 0.42	+364	<0.01			
5 (35, žena)	Ovláda nie	42	2	44	0.11 ± 0.01	+627		+57	
	UMTS	82	12	94	0.23 ± 0.03	+991	<0.01		
	0,1 Gy	136	69	205	0.51 ± 0.08	+1491	<0.01	+46	<0.02
	0,1 Gy + UMTS	200	120	320	0.80 ± 0.12	+1955	<0.01		
	0,3 Gy	267	212	479	1.20 ± 0.12	+2345	<0.01	+19	<0.01
	0,3 Gy + UMTS	396	306	702	1.75 ± 0.13		<0.01		
	0,5 Gy	535	368	903	2.26 ± 0.21	+109	<0.01		<0.03
0,5 Gy + UMTS	639	439	1078	2.69 ± 0.20		<0.01			
6 (30, muž)	Ovláda nie	15	2	17	0.04 ± 0.01				
	UMTS	56	5	61	0.15 ± 0.04	+275	<0.01		
	0,1 Gy	94	77	171	0.43 ± 0.07	+775	<0.01		
	0,1 Gy + UMTS	135	112	247	0.62 ± 0.11	+1450	<0.01	+44	<0.04
	0,3 Gy	142	127	269	0.67 ± 0.08	+1575	<0.01		
	0,3 Gy + UMTS	229	225	454	1.13 ± 0.14	+2725	<0.01	+69	<0.01
	0,5 Gy	256	223	479	1.20 ± 0.17	+2900	<0.01		
0,5 Gy + UMTS	411	340	751	1.88 ± 0.20	+4600	<0.01	+57	<0.01	

Aberr., aberácie; * pravdepodobnosť "nulovej hypotézy" pre rozdiel medzi každou exponovanou vzorkou a kontrolnou vzorkou/vzorkou vystavenou žiareniu gama; ** pravdepodobnosť "nulovej hypotézy" pre rozdiel medzi vzorkami vystavenými žiareniu gama + UMTS a zodpovedajúcimi vzorkami vystavenými len žiareniu gama; *** odchýlka vzoriek vystavených žiareniu gama + UMTS od zodpovedajúcich vzoriek vystavených len žiareniu gama.

vzorka toho istého subjektu vystavená gama žiareniu 0,5 Gy a UMTS MT EMF (15 min) so štyrmi zlomami (b), z toho dva s fragmentmi posunutými smerom k protichromatide (krátke šípky), a tromi medzerami (g).

Na obrázkoch 2B-2H sú znázornené poškodenia chromozómov vo forme chromatidových medzier a zlomov spôsobené rôznymi skúmanými stresormi (EMP mobilných telefónov, 0,1, 0,3,

0,5 Gy gama žiarenia a kombinácia EMP mobilného telefónu s rovnakými dávkami gama žiarenia).

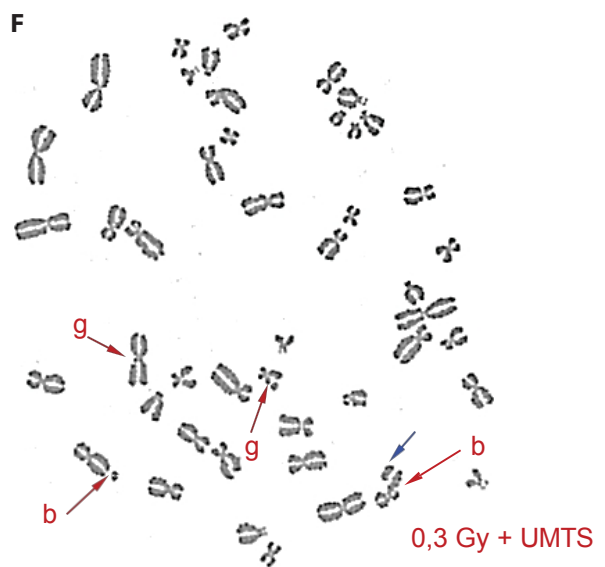
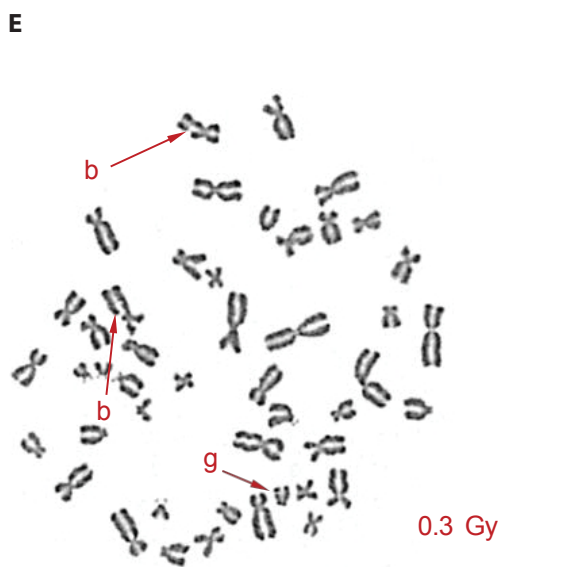
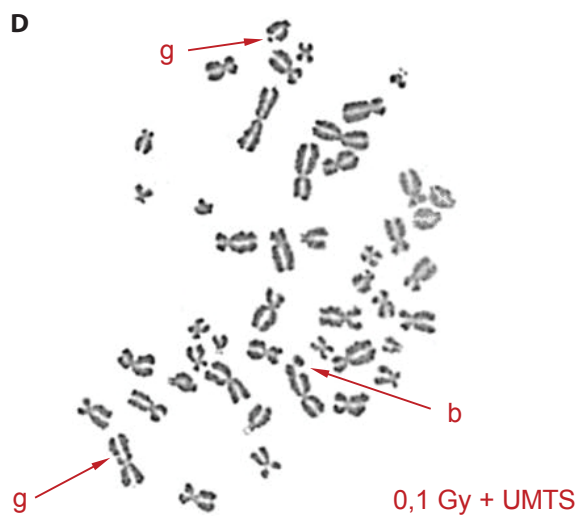
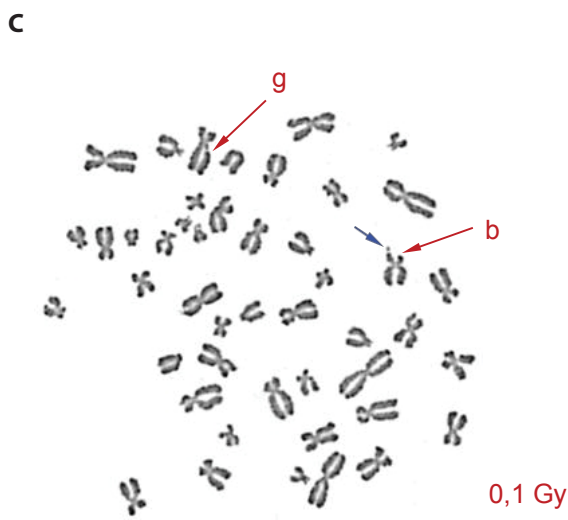
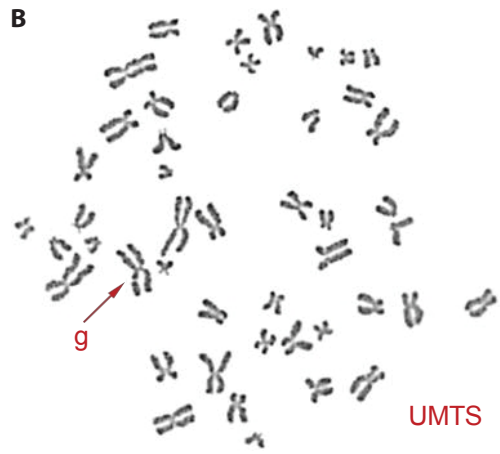
Diskusia

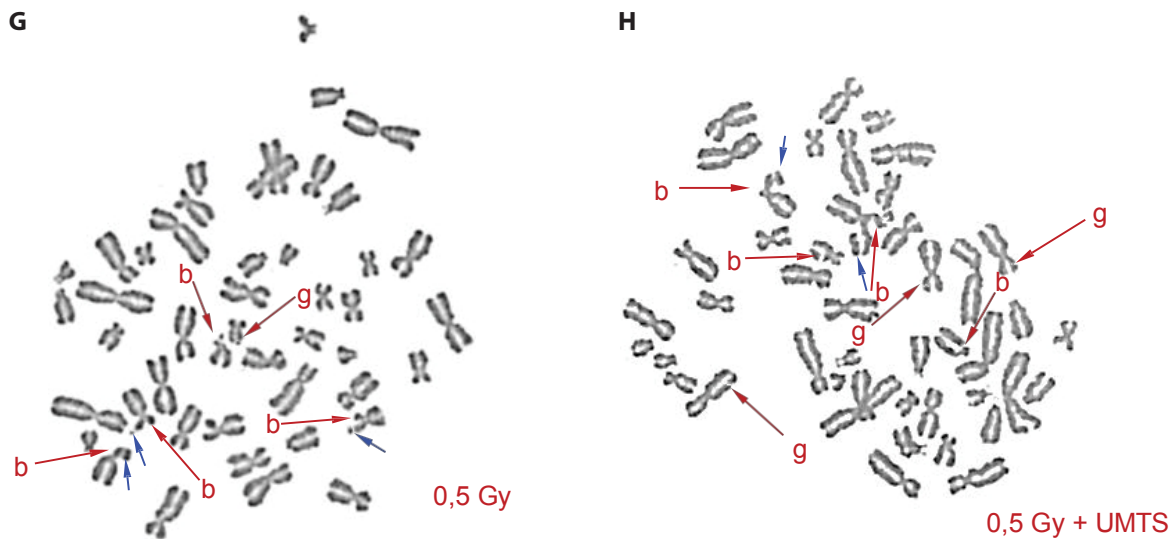
V predchádzajúcej správe o mojich experimentoch s HPBL od tých istých darcov a za identických podmienok a ex perimentálnych postupov sa ukázalo, že samotná 15-minútová expozícia UMTS vo vzdialenosti 1 cm od aktívneho mobilného telefónu 3G/4G počas aktívneho telefonického hovoru v režime "hovor" zvýšila chromatidové aberácie zo 100 % až na 275 % v porovnaní s kontrolnými/šampónmi exponovanými vzorkami (Panagopoulos 2019a). V tejto štúdii sa ukázalo, že gama žiarenie v dávkach 0,1, 0,3 a 0,5 Gy zvýšilo aberácie chromatidového typu v HPBL tých istých 6 zdravých darcov od 344 % do 2900 % v závislosti od dávky manneru vzhľadom na kontrolné/šamom exponované vzorky. Rovnaké dávky gama žiarenia v kombinácii s 15-minútovou expozíciou UMTS zvýšili chromatidové aberácie o 600 % až 4600 % v porovnaní s kontrolnými/šampónom vystavenými vzorkami. Inými slovami, kombinácia rôznych dávok gama žiarenia s 15-minútovým vystavením mobilnému telefónu 3G/4G (s vypnutými funkciami Wi-Fi a Bluetooth) výrazne zvýšila a v niektorých prípadoch takmer zdvojnásobila účinky gama žiarenia u všetkých subjektov. Počet aberácií vyvolaných kombinovanou expozíciou bol výrazne vyšší ako súčet počtu aberácií vyvolaných jednotlivými stresormi u všetkých subjektov (tabuľka 1). Expozícia MT EMF ~136-krát nižšia ako limity ICNIRP (2020) teda okrem toho, že je sama o sebe genotoxická, významne zvýšila genotoxické pôsobenie gama žiarenia pri kombinácii oboch stresorov. Synergické pôsobenie expozície MT EMP a gama žiarenia je v súlade so zisteniami iných štúdií, ktoré skúmali kombináciu rôznych typov WC EMP s rôznymi typmi ionizujúceho žiarenia v rôznych biologických modeloch (Markkanen et al. 2004; Manti et al. 2008; Cao et al. 2009; Pesnya a Romanovsky 2013; Khodamoradi et al. 2022; Szilágyi et al. 2023). Keďže gama žiarenie v podobných dávkach sa používa na účely diagnostiky a liečby rakoviny, tento výsledok naznačuje, že ľuďom/pacientom, ktorí sa podrobujú diagnostickej alebo terapeutickému liečbe ionizujúcim žiarením, by ich onkológovia/rádiológovia mali obozretne odporučiť, aby niekoľko dní pred takouto liečbou, počas nej a po nej nepoužívali mobilné/"smart" telefóny. Okrem toho je zrejme, že

že lekári/rádiológovia by mali byť osobitne vzdelávaní o účinkoch antropogénnych EMP popri účinkoch ionizujúceho žiarenia, ktoré sú už súčasťou ich vzdelávania. Biologické/zdravotné účinky ionizujúceho žiarenia sú známe už viac ako storočie. V súčasnosti je naliehavo potrebné zaoberať sa účinkami "neionizujúcich" antropogénnych EMP, ktoré dnes prevládajú v každodennom živote v porovnaní s väčšinou (ak nie všetkými) inými stresovými faktormi. Je potrebné, aby podrobnejšie skúmanie už zaznamenaných účinkov vykonávali vedci bez konfliktu záujmov. Hoci antropogénne EMP nie sú priamo ionizujúce, v živých tkanivách sa stávajú ionizujúcimi a genotoxickými nepriamo prostredníctvom pôsobenia ROS, ktoré vznikajú v živých bunkách (Yaky-menko et al. 2016; Panagopoulos et al. 2021, 2022b).

Okrem nárastu aberácií chromatidového typu od 100 % do 275 % v dôsledku 15-minútovej expozície 3G/4G MT/WC EMF (Panagopoulos 2019a a tabuľka 1) sa predtým ukázalo, že zodpovedajúci nárast vyvolaný extrémnou dávkou kofeínu za identických podmienok a experimentálnych postupov sa pohyboval od 89 % do 250 % (Panagopoulos 2020). Ukázalo sa teda, že jednorazová expozícia MT EMP ~ 136-krát nižšia ako najnovší limit ICNIRP (2020) vyvolala chromozomálne aberácie v mierne vyššej miere ako dávka kofeínu ~ 290-krát vyššia ako prípustná jednorazová dávka kofeínu pre dospelého človeka (Panagopoulos 2020). Za predpokladu linearity účinkov EMP UMTS a kofeínu ako najlepšej možnej aproximácie a za predpokladu správnosti limitu jednorazovej dávky kofeínu (keďže účinky kofeínu na ľudský organizmus sú na rozdiel od účinkov EMP rýchle a zjavné), z tohto porovnania vyplýva, že expozičné limity stanovené ICNIRP (2020) pre mikrovlnné EMP môžu byť oveľa menej prísne (~136×290 alebo ~40000 krát) ako limity pre kofeín, a preto by sa mali znížiť (aspoň) ~40000 (= 4×10^4) krát.

V tejto štúdii sa gama žiarenie 0,1 Gy, (ktoré ako už bolo vysvetlené, je najmenej ~1000-krát vyššia ako primeraný limit akútnej dávky), spôsobila nárast chromatidových aberácií od 344 % do 775 % v porovnaní s kontrolnými vzorkami, čo je (v priemere) menej ako trikrát viac ako zodpovedajúci nárast spôsobený 15-minútovou expozíciou EMP mobilného telefónu s hustotou výkonu ~136-krát nižšou ako zodpovedajúci limit expozície (tabuľka 1). Ak opäť predpokladáme linearitu pre účinky EMP UMTS a pre účinky gama žiarenia a ak prijmem limit dávky pre gama žiarenie ako správny, keďže jeho smrteľné účinky sú známe už viac ako 120 rokov, toto porovnanie naznačuje, že expozičné limity stanovené pre mikrovlnné EMP komisiou ICNIRP (2020) môžu byť oveľa menej prísne (~136×1000/3 alebo ~4,5×10⁴ = 45000 krát) ako v prípade žiarenia gama. To je veľmi podobne ako v mojej predchádzajúcej štúdii odvodené z porovnania s kofeínom (Panagopoulos 2020). Teda v





Obrázok 2. A. Metafáza z kontrolnej (falošne exponovanej) vzorky krvi subjektu č. 6 (muž) so všetkými 46 neporušenými chromozómami.

B. Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného UMTS MT EMF počas 15 minút s 1 achromatickou léziou - medzerou (g).

C. Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného 0,1 Gy s 1 terminálnou deléciou - zlomom (b) s posunutým fragmentom (krátka šípka) a 1 achromatickou léziou - medzerou (g). **D.** Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného kombinácií gama žiarenia 0,1 Gy a UMTS MT EMF 15 min, s 1 terminálnou deléciou - zlomom (b) a 2 achromatickými léziami - medzerami (g).

E. Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného gama žiareniu 0,3 Gy s 2 terminálnymi deléciami - zlomami (b) a 1 achromatickou léziou - medzerou (g). **F.** Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného kombinácií gama žiarenia 0,3 Gy a UMTS MT EMF 15 min, s 2 terminálnymi deléciami - zlomami (b) (jeden izochromatický zlom a jeden s posunutým fragmentom - krátka šípka) a 2 achromatickými léziami - medzerami (g).

G. Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného gama žiareniu 0,5 Gy so 4 terminálnymi deléciami - zlomami (b), tri z nich s fragmentmi posunutými smerom k protichromatide (krátke šípky) a 1 achromatickou léziou - medzerou (g). **H.** Metafáza zo vzorky krvi toho istého subjektu vystaveného kombinácií žiarenia gama 0,5 Gy a UMTS MT EMF 15 min, so 4 terminálnymi deléciami - zlomami (b), dvoma s posunutými fragmentmi (krátke šípky) a 3 achromatickými léziami - medzerami (g).

aby boli limity ICNIRP pre vystavenie WC EMP kompatibilné s limitom pre kofeín, mali by sa znížiť (aspoň) 40000-krát, a aby boli kompatibilné s limitom pre ionizujúce žiarenie, mali by sa znížiť (aspoň) 45000-krát. Tieto výsledky naznačujú, že limitné hodnoty ICNIRP pre WC EMP sú značne neprimerané.

Znížením limitu ICNIRP na rok 2020, ktorý je $4000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (pre 2 GHz v priemere za 6 minút expozície), na 4×10^4 (alebo $4,5 \times 10^4$) krát by sa limit stal $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (alebo $0,08 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ čo je veľmi blízko) pre krátkodobé expozície. Porovnanie s kofeínom alebo ionizujúcim žiarením teda určuje približne rovnaký limit pre krátkodobú expozíciu WC EMP.

($\sim 0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$). Ďalším znížením tejto hodnoty aspoň o 100 pre dlhodobé expozície sa z nej stane $0,001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Tieto limity pre krátkodobú a dlhodobú expozíciu okrem toho, že sú v súlade s limitom pre spotrebu kofeínu aj s limitom pre ionizujúce žiarenie, sú skutočne relevantné ako ochranné limity podľa experimentálnych výsledkov v literatúre o biologických účinkoch EMP vrátane experimentov *in vivo* (Panagopoulos et al. 2010; Panagopoulos 2019b, 2022a) a v súlade s limitmi navrhovanými inými odborníkmi (pozri tabuľku 3 v Belyaev et al. 2016).

Treba poznamenať, že hoci sa zistilo, že priemerná hustota výkonu mobilného telefónu je ~ 136 -krát nižšia ako najnovší limit hustoty výkonu ICNIRP (2020), úroveň SAR zariadenia je len ~ 3 -krát nižšia ako príslušný limit SAR ($2 \text{ W}/\text{kg}$). To poukazuje na rozpor medzi hustotou dopadajúceho výkonu, ktorú možno priamo a objektívne zmerať akýmkoľvek dôveryhodným meračom EMP dostupným na trhu, a SAR, ktorá sa vzťahuje na absorbovaný výkon ľudským tkanivom a vypočítava sa zjednodušenými simulačnými metódami s využitím modelov ľudskej hlavy vyrobených z plastu a naplnených vodou. Okrem toho sa ukazuje, že SAR je ako meradlo bioaktivity EMP nevhodný. Zatiaľ čo hustota výkonu (alebo intenzita žiarenia) je nezávislá od tepelných alebo netepelných účinkov, SAR je použiteľná len na tepelné účinky, ktoré sú v tomto prípade úplne zanedbateľné (Gandhi et al. 2012; Panagopoulos et al. 2013, 2022a).

Podobne ako v predchádzajúcej štúdií, ktorá skúmala kombináciu expozície MT EMF s vysokou dávkou kofeínu, aj táto štúdia ukázala, že pri kombinácii MT EMF s gama žiarením sa počet indukovaných chromatidových aberácií dramaticky zvýšil v porovnaní s účinkom každého stresora samostatne (tab. 1, obr. 1). Výsledky

predchádzajúca štúdia (Panagopoulos 2020) ukázala, že intenzívna konzumácia kávy v kombinácii s používaním mobilného telefónu môže významne zvýšiť zdravotné riziká a že kombinácia dvoch (alebo viacerých) samostatných stresorov (tzv. ko-stresové kondície) môže mať oveľa väčší biologický účinok ako súčet jednotlivých účinkov každého stresora samostatne. Podobne aj výsledky tejto štúdie ukazujú, že vystavenie ionizujúcemu žiareniu v kombinácii s vystavením MT EMP má oveľa väčší biologický účinok ako súčet jednotlivých účinkov každého stresora samostatne. Účinok kombinovaného stresu, ktorý je väčší ako súčet jednotlivých účinkov, je pravdepodobne spôsobený tým, že prvý stresor oslabuje organizmus, a teda je zraniteľnejší voči druhému, ako keby druhý stresor pôsobil samostatne, v súlade so známou Knudsonovou "hypotézou dvoch zásahov" pre karcinogézu (Knudson 1971; Panagopoulos et al. 2022b).

Keďže antropogénna expozícia EMP v rôznych frekvenčných pásmach spektra (RF, ELF atď.) predstavuje novú realitu v každodennom živote každého človeka, jej kombinácia s rôznymi inými existujúcimi stresormi na ľudskej/biologické systémy (ako je vývoj, starnutie, choroby, infekcie, ionizujúce žiarenie, chemické látky, liečivá, fajčenie, pitie kávy, psychický stres atď.

Podobne ako predchádzajúce štúdie ukázali, že účinky expozície MT EMP na ľudí/zvieratá sú závislé od dávky a takmer lineárne sa zvyšujú s dĺžkou expozície (Panagopoulos a Margaritis 2010; El-Abd a Eltoweissy 2012; Panagopoulos 2020), aj táto štúdia opäť potvrdila, že účinky gama žiarenia sú závislé od dávky a zvyšujú sa s rastúcimi dávkami (Prasad 1995; Nias 1998; Hall a Giaccia 2006). V predchádzajúcich štúdiách mojej skupiny spôsobila expozícia ovocných mušiek EMP z mobilných telefónov 2G (GSM) rozsiahle poškodenie DNA v gametách, ktoré viedlo k odumretiu buniek a poklesu reprodukčnej schopnosti (Panagopoulos et al. 2007, 2010; Chavdoula et al. 2010; Panagopoulos 2012). Keďže poškodenie DNA sa mení na chromozomálne poškodenie počas skorej M fázy bunkového deliaceho cyklu (Terzoudi a Pantelias 2006; Pantelias a Terzoudi 2010; Terzoudi et al. 2011; Tian et al. 2018), zaznamenané chromozomálne poškodenie vyvolané EMP UMTS (3G/4G) MT/WC a/alebo kofeínom a/alebo gama žiarením je zrejme spôsobené poškodením DNA spôsobeným týmito stresormi.

Zaznamenané účinky na HPBL sú v úplnom súlade s predchádzajúcimi výsledkami mojej skupiny, ktorá zistila rozsiahle poškodenie DNA v bunkách vaječníkov ovocných mušiek po vystavení *in vivo* GSM (2G) MT žiareniu z mobilného telefónu (Panagopoulos et al. 2007, 2010; Chavdoula et al. 2010; Panagopoulos 2012, 2019b), ako aj so štúdiami *in vivo*, v ktorých sa zistilo poškodenie OS a genetické poškodenie HPBL (Ji et al. 2004; Gulati et al. 2016; Zothansiana et al. 2017), čo opäť dokazuje, že EMP MT/WC sú veľmi genotoxické/bioaktívne, schopné vyvolať poškodenie DNA a následné chromozomálne poškodenie v ľudských aj živočíšnych bunkách,

in vitro alebo *in vivo*. Malo by sa to očakávať, keďže bunky sú v podstate rovnaké u všetkých zvierat (vrátane ľudí) a všetky biologické/zdravotné účinky sa iniciujú na bunkovej úrovni (Panagopoulos 2019b). Je dôležité poznamenať, že vystavenie ľudských krvných buniek MT EMP *in vitro* a porovnanie buď s kofeínom, alebo s vystavením gama žiareniu,

stanovuje rovnaký limit $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pre krátkodobé expozície (resp. $0,001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pre dlhodobé expozície) pre MT/WC EMP ako predchádzajúce štúdie mojej skupiny založené na expozície *in vivo* na zvieratách (Panagopoulos et al. 2010).

Hlavným typom aberácií vyvolaných buď vystavením MT EMP, kofeínu alebo kombináciou oboch stresorov boli chromatidové medzery (achromatické zmeny). Gama žiarenie vyvolalo medzery aj zlomy, ale vo vyššej miere ako MT EMP alebo kofeín. Okrem toho sa percento zlomov oproti medzerám významne zvýšilo pri vystavení gama žiareniu a zvyšovalo sa so zvyšujúcimi sa dávkami (tabuľka 1). Zatiaľ čo chromatidové zlomy sú intenzívnejšie poškodenia a ľahšie sa rozpoznávajú (Conger 1967), medzery aj zlomy sú poškodenia rovnakej povahy a vlastne medzery sú neúplné zlomy (Brecher 1977). Zatiaľ čo medzi mnohými výskumníkmi zaoberajúcimi sa účinkami ionizujúceho žiarenia na chromozómy sa prijalo, že len zlomy (a nie medzery) sú "pravé" chromozómové aberácie (Gileva 2002; IAEA 2011), moje súčasné a predchádzajúce štúdie (Panagopoulos 2019a, 2020) ukázali, že pri slabších klastogénnych vplyvoch, ako sú vplyvy neionizujúceho žiarenia a antropogénnych EMP alebo kofeínu, by sa pri hodnotení genotoxických účinkov mali počítať zlomy aj medzery (celkový počet aberácií). Ignorovanie medzier a počítanie len zlomov môže byť jedným z dôvodov, prečo sa v niektorých predchádzajúcich štúdiách nezistili štatisticky významné účinky MT/WC EMP na lymfocyty ľudskej krvi, okrem vystavenia počas

odolnejšie bunkové podmienky (napr. počas fázy G₀ namiesto počas bunkového deliaceho cyklu a najmä jeho najcitlivejších fáz M, G₂) a na použitie simulovaných MT/WC signálov namiesto skutočných signálov. Prehľad takýchto štúdií nájdete v publikácii Panagopoulos (2019a, 2020). Hoci v prípade ionizujúceho žiarenia stačí na preukázanie účinkov samotné počítanie zlomov a postup počítania sa stáva oveľa jednoduchším a rýchlejšim, zdá sa, že počítanie zlomov aj medzier je potrebné v prípadoch miernejších klastogénnych činiteľov (ako je neionizujúce a netepelné vystavenie EMP alebo kofeín) a možno aj v prípade ionizujúceho žiarenia, by poskytol podrobnejší a presnejší odhad genetického poškodenia.

Zaznamenané chromatidové aberácie vyvolané expozíciou MT EMP sú netepelným účinkom, pretože neboli sprevádzané žiadnym výrazným zvýšením teploty exponovaných vzoriek krvi. Najvyšší nárast teploty o 0,1 °C počas 15-minútovej expozície je absolútne nevýznamný, ako už bolo vysvetlené (Panagopoulos 2019a, 2020). Nedostatočne nasadená technológia 5G s výrazne vyššou

nosných frekvencií až do 100 GHz, oveľa hustejších anténnych sietí a intenzívnejších a kolimovanejších zväzkov žiarenia sa očakáva, že okrem netepelných účinkov vyvolá aj významné tepelné účinky, ktoré ľudský/zvierací organizmus nemusí tolerovať (Neufeld a Kuster 2018; Hardell a Carlberg 2020; Panagopoulos et al. 2022a). To môže predstavovať veľkú hrozbu pre verejné zdravie, ktorú by mali zdravotnícke orgány pred povolením inštalácie 5G starostlivo preskúmať.

Ukázalo sa, že reálne WC EMP vysielané komerčne dostupnými mobilnými telefónnymi zariadeniami, Wi-Fi routermi, DECT telefónmi alebo základňovými anténami/bunkovými vežami sú oveľa bioaktívnejšie ako simulované zodpovedajúce signály s premenlivými parametrami vysielané generátormi (Panagopoulos et al. 2015a; Panagopoulos 2017, 2019b; Leach et al. 2018; Kostoff et al. 2020; McCredde et al. 2022, 2023). To je ďalší dôvod, prečo sa v niektorých predchádzajúcich štúdiách nezaznamenali žiadne účinky simulovaných MT EMF na ľudské lymfocyty (Zeni et al. 2003, 2012; Stronati et al. 2006; Schwarz et al. 2008), zatiaľ čo v mojich štúdiách, v ktorých sa použila reálna expozícia 3G/4G WC EMF, sa zistil veľmi intenzívny účinok (až 275 % nárast chromatidových aberácií v porovnaní s kontrolnými vzorkami). Zo šiestich predchádzajúcich štúdií s humánnymi lymfocytmi vystavenými reálnym MT EMP (Ji et al. 2004; Gulati et al. 2016; Danese et al. 2017; Zothansiamia et al. 2017; Panagopoulos 2019a, 2020) sa v piatich zistili účinky (Ji et al. 2004; Gulati et al. 2016; Zothansiamia et al. 2017; Panagopoulos 2019a, 2020) v súlade s väčšinou štúdií o lymfocytoch, zatiaľ čo jedna štúdia (Danese et al. 2017) ich nezistila. Ide o jedinú štúdiu nájdenú v literatúre využívajúcu reálnu expozíciu EMP na WC, ktorá nezaznamenala žiadny vplyv na ľudské lymfocyty, a jednu z mála štúdií na akomkoľvek biologickom modeli (Panagopoulos 2017, 2019b). V tejto štúdií sa okrem iných otázok, o ktorých sa diskutovalo predtým (Panagopoulos

2020), exponovali bunky počas ich pokojovej fázy G₀, podobne ako Stronati et al. (2006), namiesto toho, aby ich exponovali počas cyklu bunkového delenia, a to najmä najcitlivejšie fázy M, G₂ (Nias 1998; Terzoudi et al. 2011).

Štúdie, ktoré zistili vystavenie UMTS (3G/4G) v reálnom živote

byť ešte genotoxickéjšie ako reálne GSM (2G) (D'Silva et al. 2017, 2021) sú v súlade so skutočnosťou, že novšie typy MT/WC EMP (3G, 4G, 5G) prenášajú čoraz väčšie množstvo/hustotu premenlivých informácií (reč, text, obrázky, video, internet), čím sa signál stáva čoraz komplikovanejším, nepredvídateľne sa meniacim v každom okamihu, a teda čoraz viac bioaktívnym v dôsledku neschopnosti živých organizmov prispôbiť sa vysoko premenlivému stresoru. Očakáva sa teda, že účinky nedostatočne nasadeného 5G MT EMF budú ešte intenzívnejšie ako účinky 2G, 3G, 4G. Zodpovedné orgány verejného zdravotníctva to mali vážne zvážiť.

Keďže zdravotné účinky všetkých EMP na WC (vrátane MT, Wi-Fi, telefónov DECT, bezdrôtových pripojení Bluetooth atď.)

sú v dnešnej dobe mimoriadne dôležité, mali by sa uskutočniť štúdie na testovanie najcitlivejších biologických podmienok s reálnou expozíciou a v kombinácii s inými environmentálnymi stresormi, inak môžu byť výsledky z hľadiska ochrany verejného zdravia nesprávne. Expozície akýmkoľvek typom simulovaných signálov a v rámci akéhokoľvek typu expozičných komôr používaných na vytvorenie "jednotných" expozícií, ako sú "reverberačné komory" alebo "TEM komory" (Ardoino et al. 2005; Wu et al. 2009), nepredstavujú reálne podmienky expozície a môžu priniesť zavádzajúce výsledky smerom k zisteniam "bez účinku" (Panagopoulos 2019b, 2023). Používanie generátorov a expozičných komôr poskytovaných spoločnosťami na vystavenie biologických vzoriek simulovaným EMP WC bez poznania a merania fyzikálnych detailov generovaných EMP je hlavným problémom experimentálnych štúdií (Panagopoulos 2023). Simulované EMP WC s pevne stanovenými parametrami (intenzita, frekvencia, pulzácie atď.) sa v skutočnosti veľmi líšia od skutočných extrémne premenlivých EMP WC. Zmyslom skúmania účinkov WC EMP je posúdiť biologické pôsobenie reálnych WC EMP, a nie idealizovaných simulovaných EMP, ktoré vyvolávajú menšie alebo žiadne účinky. Aj v prípadoch, keď chcú experimentátori testovať biologickú aktivitu určitých parametrov signálu, a teda použitie idealizovaných signálov môže byť opodstatnené, musia experimentátori sami merať detaily signálu a nespoliehať sa na to, čo oznámi výrobca takýchto zariadení.

Narušenie elektrochemickej rovnováhy buniek človekom vytvorenými (polarizovanými a koherentnými) EMP prostredníctvom nepravidelného gatingu napäťovo riadených iónových kanálov (VGIC) v bunkových membránach sa opisuje mechanizmom "iónovej nútenej oscilácie a dysfunkcie VGIC" (mechanizmus IFO-VGIC) (Panagopoulos et al. 2000, 2002, 2015b, 2021; Panagopoulos 2022b). Podľa tohto mechanizmu sú pohyblivé ióny v bunkách nútené k oscilácii paralelne a vo fáze s aplikovanými umelými oscilujúcimi EMP a táto koordinovaná oscilácia elektrického náboja pôsobí konštruktívnymi Coulombovými silami na senzory kanálov VGIC podobne ako pri zmenách membránového napätia, ktoré fyziologicky bránia VGIC. To spôsobuje nepravidelné zapínanie, a teda dysfunkciu VGIC, čo vedie k vnútrobunkovému uvoľňovaniu ROS, ktoré napokon spôsobujú genetické/bunkové poškodenie (Panagopoulos et al. 2021, 2022b). To je v súlade s pripisovaním poškodenia DNA a chromozómov OS podľa El Abd a Eltoweissy (2012), s potvrdenou súvislosťou antropogénnej expozície EMP s OS (Phillips et al. 2009; Pall 2013; Yakymenko et al. 2016) a so známym účinkom ROS na DNA a iné bunkové makromolekuly (Barzilai a Yamamoto 2004). Hoci niektoré iné štúdie neuvádzajú žiadnu súvislosť medzi simulovanými signálmi EMP WC a OS (Poullietier de Gannes a kol. 2011), dnes existujú presvedčivé dôkazy o tom, že vystavenie EMP spôsobené človekom (vrátane WC), a hlavne vystavenie v reálnom živote, vyvoláva rôzne biologické/zdravotné účinky, ktoré sú vo väčšine, ak nie vo všetkých prípadoch

sprevádzané OS (Yakymenko et al. 2016; Yakymenko a Tsibulin 2022b).

To, čo Pall (2018) označil ako mechanizmus aktivácie napäťovo riadených vápnikových kanálov ("mechanizmus aktivácie VGCC"), nie je nič iné ako mechanizmus IFO-VGIC konkrétne na vápnikových napäťovo riadených iónových kanáloch a nemal by sa uvádzať ako iný mechanizmus. Pall tvrdil, že navrhol odlišný mechanizmus len preto, lebo predpokladal, že VGIC sú gated "priamymi" silami na ich napäťové senzory "prenikajúcimi" VF EMP namiesto ELF síl pôsobiacich na oscilujúce ióny v tesnej blízkosti senzorov. Nemožnosť Pallových tvrdení sa analyzuje v komentároch (Foster a Balzano 2021; Panagopoulos 2021; Arribas et al. 2022).

Základné závery tejto štúdie sú: 1) expozícia MT EMF, okrem toho, že je sama o sebe genotoxická, významne zvyšuje genotoxické pôsobenie gama žiarenia pri kombinovanej expozícii; 2) ľuďom/pacientom, ktorí sa podrobujú diagnostickej alebo terapeutickému liečbe ionizujúcim žiarením, by sa malo obozretne odporučiť, aby sa niekoľko dní pred, počas a po takejto liečbe vyhli používaniu WC zariadení;

3) Lekári/rádiológovia by mali byť osobitne vzdelávaní o rizikách antropogénneho vystavenia EMP p o p r i rizikách ionizujúceho žiarenia; 4) Porovnanie s kofeínom a gama žiarením naznačuje, že limity ICNIRP (2020) pre vystavenie WC EMP by sa mali znížiť 40000, resp. 45000-krát; 5) Limit pre krátkodobé

dlhodobá (akútna) expozícia by potom mala byť $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ a pre dlhodobú expozíciu $0,001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$; 6)

v ďalších štúdiách by sa mali prioritne skúmať kombinované účinky EMP vytvorených človekom v reálnom živote s rôznymi inými environmentálnymi stresormi.

Podakovanie. Ďakujem Dr. G. Panteliasovi, G. Terzoudiovi, M. Karakostovi a V. Hatziovi za zdieľanie laboratórnych techník s ľudskými lymfocytmi a A. Vasilaki a K. Barszczewskiej za laboratórnu asistenciu a pomoc pri slepom bodovaní. Štúdia bola podporená z osobitného účtu pre výskumné granty Národnej a Kapodistrijskej univerzity v Aténach.

Konflikt záujmov. Autor neuvádza žiadne skutočné ani potenciálne konkurenčné finančné záujmy.

Odkazy

Ardoino L, Lopresto V, Mancini S, Marino C, Pinto R, Lovisolo GA (2005): Rádiofrekvenčný systém na pilotné experimenty in vivo zamerané na štúdium biologických účinkov elektromagnetických polí. *Phys. Med. Biol.* **50**, 3643-3654 <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/15/011>

Arribas E, Escobar I, Martinez-Plaza A, Ramirez-Vazquez R (2022): Pall "Millimeter (MM) wave and micro-wave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics". *Rev. Environ. Health* **38**, 193-196

- <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0180>
- Baan R, Grosse Y, Lauby Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim Tallaa L, Guha N, Islami F, Galichet L, Straif K (2011): Pracovná skupina pre monografiu Medzinárodnej agentúry WHO pre výskum rakoviny: Carcinogenicity of radiofre- quency electro-magnetic fields. *Lancet Oncol.* **12**, 624-626 [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70147-4)
- Balmori A (2022): Vplyv elektromagnetických polí vytvorených človekom a najmä bezdrôtovej komunikácie na voľne žijúce živočíchy. In: *Electro- magnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects* (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-14>
- Barzilai A, Yamamoto K (2004): Reakcie na poškodenie DNA pri oxidačnom strese (Review). *DNA Repair* **3**, 1109-1115 <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2004.03.002>
- Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshammer H, Lercher P, Müller K, et al. (2016): EUROPAEM Usmernenie 2016 o prevencii, diagnostike a liečbe zdravotných problémov a ochorení súvisiacich s EMP. *Rev. Environ. Health* **31**, 363-397 <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0011>
- Betta G, Capriglione D, Cerro G, Miele G, Wali SQ, Ruttner M, Sali A, Šuka D (2023): Expozícia ľudí systémom 5G: ex perimentálna analýza a otázky merania v prevádzkových pásmach FR1 a FR2. 2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Kuala Lumpur, Malaysia. pp. 1-6 <https://doi.org/10.1109/I2MTC53148.2023.10176034>
- Brecher S (1977): Ultraštruktúrálna pozorovania chromatidových medzier indukovaných röntgenovým žiarením. *Mutat. Res.* **42**, 249-268 [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(77\)80028-6](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(77)80028-6)
- Burcham WE, Jones M (1995): (B. Jones): Jadrová a časticová fyzika. Pearson, Anglicko <https://doi.org/10.1063/1.2808262>
- Cao Y, Zhang W, Lu MX, Xu Q, Meng QQ, Nie JH, Tong J (2009): 900-MHz mikrovlnné žiarenie zvyšuje nepriaznivé účinky gama žiarenia na bunky SHG44. *J. Toxicol. Environ. Health A* **72**, 727-732 <https://doi.org/10.1080/15287390902841466>
- Carlberg M, Hardell L (2017): Hodnotenie používania mobilných a bezdrôtových telefónov a rizika gliómu pomocou formulára Bradford Hill 1965 o asociácii alebo kauzalite. *BioMed Res. Int.* **2017**, 9218486 <https://doi.org/10.1155/2017/9218486>
- Chavdoula ED, Panagopoulos DJ, Margaritis LH (2010): Porovnanie biologických účinkov medzi nepretržitou a prerušovanou expozíciou žiareniu mobilných telefónov GSM-900 MHz. Zisťovanie znakov apoptotickej bunkovej smrti. *Mutat. Res.* **700**, 51-61 <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.05.008>
- Conger AD (1967): Skutočné chromatidové delécie verzus medzery. *Mutat. Res.* **4**, 449-459 [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(67\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0027-5107(67)90007-3)
- Dahlman E, Parkvall S, Skoeld J (2018): 5G NR: Technológia bezdrôtového prístupu novej generácie. Academic Press, Elsevier, Londýn
- Danese E, Lippi G, Buonocore R, Benati M, Bovo C, Bonaguri C, Salvagno GL, Brocco G, Roggenbuck D, Montagnana M (2017): Vystavenie rádiofrekvencii mobilného telefónu nemá žiadny vplyv

- na dvojlákové zlomy DNA (DSB) v ľudských lymfocytoch. *Ann. Transl. Med.* **5**, 272
<https://doi.org/10.21037/atm.2017.04.35>
- D'Silva MH, Swer RT, Anbalagan J, Rajesh B (2017): Vplyv rádiového žiarenia vyžarovaného z mobilných telefónov 2G a 3G na vyvíjajúcu sa pečeň kuracieho embrya: porovnávací štúdia. *J. Clin. Diagn. Res.* **11**, 5-9
<https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/26360.10275>
- D'Silva MH, Swer RT, Anbalagan J, Bhargavan R (2021): Hodnotenie poškodenia DNA v mozgoch kuracích embryí vystavených žiareniu mobilných telefónov 2G a 3G pomocou techniky alkalickéj kométy. *J. Clin. Diagn. Res.* **15**, AC01-AC04
<https://doi.org/10.7860/JCDR/2021/47115.14441>
- El-Abd SF, Eltoweissy MY (2012): Cytogenetické zmeny v kultúre ľudských lymfocytov po vystavení rádiovým vlnám mobilného telefónu. *JAPS* **2012**, 16-20
- Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, Lauriola M, De Angelis L, Gnudi F, Mandrioli D, Manservigi M, Manservigi F, Manzoli I, et. al. (2018): Správa o konečných výsledkoch týkajúcich sa nádorov mozgu a srdca u potkanov Sprague-Dawley vystavených od prenatalného života až po prirodzenú smrť rádiovým vlnám mobilných telefónov reprezentujúcemu environmentálne emisie základňovej stanice GSM 1,8 GHz. *Životné prostredie. Res.* **165**, 496-503
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.037>
- Foster KR, Balzano Q (2021): Pripomenky k článku Martina Palla "Milimetrové (MM) vlny a mikrovlnné žiarenie vyvolávajú hlboko prenikajúce účinky: biológia a fyzika". *Rev. Životné prostredie. Health* **37**, 247-258
<https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0165>
- Gandhi Om P, Morgan LL, de Salles AA, Han Y-Y, Herberman RB, Davis DL (2012): Exposure limits (Limity vystavenia): (The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children). *Electromagn. Biol. Med.* **31**, 34-51
<https://doi.org/10.3109/15368378.2011.622827>
- Gileva EA (2002): Chromatidové medzery ako marker mutagénneho účinku znečistenia životného prostredia u komenzálnych a voľne žijúcich hlodavcov na Urale. *Tsitol. Genet.* **36**, 17-22
- Gulati S, Yadav A, Kumar N, Kanupriya, Aggarwal NK, Kumar R, Gupta R (2016): Vplyv polymorfizmov GSTM1 a GSTT1 na genetické poškodenie u ľudskej populácie vystavenej žiareniu z mobilných veží. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **70**, 615-625
<https://doi.org/10.1007/s00244-015-0195-y>
- Hall EJ, Giaccia AJ (2006): (6. vydanie). Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA
- Hardell L, Carlberg M, Hansson Mild K (2013): Use of mobile telephony and cordless telephony is associated with an increased risk of glioma and acoustic neuroma. *Pathophysiology* **20**, 85-110
<https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2012.11.001>
- Hardell L (2017): Svetová zdravotnícka organizácia, rádiové žiarenie a zdravie - tvrdý oriešok (recenzia). *Int. J. Oncol.* **51**, 405-413
<https://doi.org/10.3892/ijo.2017.4046>
- Hardell L (2019): Poznámky k vypočítaniu v estónskom Tallinne 4. júna 2019 v súvislosti so zavádzaním piatej generácie bezdrôtovej komunikácie 5G. *World Acad. Sci. J.* **1**, 275-282
<https://doi.org/10.3892/wasj.2019.28>
- Hardell L, Carlberg M (2020): Zdravotné riziká rádiových vln vrátane 5G by mali posudzovať odborníci bez konfliktu záujmov. *Oncol. Lett.* **20**, 15
<https://doi.org/10.3892/ol.2020.11876>
- Hardell L, Nyberg R (2020): (5G): Appeals that matter or not on a moratorium on the deployment of the fifth generation, 5G, for microwave radiation. *Mol. Clin. Oncol.* **12**, 247-257
<https://doi.org/10.3892/mco.2020.1984>
- MAAE (2011): Cytogenetická dozimetria: Aplikácie v oblasti prípravy na radiačné havárie a reakcie na ne. Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu
- IARC (2000): Ionizujúce žiarenie. Časť I: röntgenové a gama (γ) žiarenie a neutróny. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* **75**, 1-448
- IARC (2002): Neionizujúce žiarenie. Časť 1: Statické a extrémne nízkofrekvenčné (ELF) elektrické a magnetické polia. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* **80**, 1-224
- Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny, WHO
- IARC (2013): IARC: Neionizujúce žiarenie. Časť 2: Rádiové a nízkofrekvenčné elektromagnetické polia. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* **102**, 1-224
- ICNIRP (1998): Usmernenia na obmedzenie vystavenia časovo premenlivým elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým poliam (do 300 GHz). *Health Phys.* **74**, 494-522
- ICNIRP (2020): Usmernenia na obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz). *Health Phys.* **118**, 483-524
<https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- Jagatia GC (2022): Genotoxické účinky elektromagnetických polí bezdrôtovej komunikácie. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biologické a zdravotné účinky*. (Ed. DJ Panagopoulos). CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL
<https://doi.org/10.1201/9781003201052-7>
- Ji S, Oh E, Sul D, Choi JW, Park H, Lee E (2004): Poškodenie DNA lymfocytov u dobrovoľníkov po 4 hodinách používania mobilného telefónu. *J. Prev. Med. Public Health* **37**, 373-380
- Juutilainen J, Heikkinen P, Soikkeli H, Mäki-Paakkanen J (2007): Frekvencia mi-kronukleov v erytrocytoch myši po dlhodobom vystavení rádiovým vlnám. *Int. J. Rad. Biol.* **83**, 213-220
<https://doi.org/10.1080/09553000601169800>
- Khodamoradi E, Afrashi S, Khoshgard K, Fathi F, Shahasvari S, Azmoonfar R, Naja M (2022): Simultánny účinok gama a Wi-Fi žiarenia na expresiu gama-H2Ax v periférnej krvi potkanov: A radio-protection note. *Biochem. Biophys. Rep.* **30**, 101232
<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2022.101232>
- Klimov A (1975): Klimov: Jadrová fyzika a jadrové reaktory. Vydavateľstvo Mir, Moskva
- Knudson AG Jr (1971): Mutácie a rakovina: štatistická štúdia retinoblastómu. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **68**, 820-823
<https://doi.org/10.1073/pnas.68.4.820>
- Kostoff RN, Heroux P, Aschner M, Tsatsakis A (2020): Nepriaznivé účinky mobilnej sieťovej technológie 5G na zdravie v reálnych podmienkach. *Toxicol. Lett.* **323**, 35-40
<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020>
- Lai H (2021): Lai Lai: Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields (Genetické účinky neionizujúcich elektromagnetických polí). *Electromagn. Biol. Med.* **40**, 264-273
<https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866>
- Leach V, Weller S, Redmayne M (2018): A novel database of bio effects from non ionizing radiation. *Rev. Environ. Health* **33**, 273-280

- <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0017>
- Maes A, Collier M, Verschaeve L (2000): Cytogenetické skúmanie mikrovln vyžarovaných automobilovým telefónom 455,7 MHz. *Folia Biologica* **46**, 175-180
- Mansourian M, Firoozabadi M, Hassan ZM (2020): Úloha 217-Hz ELF magnetických polí vyžarovaných z mobilných telefónov GSM na mechanizmy elektrochemoterapie. *Electromagn. Biol. Med.* **39**, 239-249
<https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1762635>
- Manti L, Braselmann H, Calabrese ML, Massa R, Pugliese M, Scampoli P, Sicignano G, Grossi G (2008): Vplyv modulovaného mikrovlnného žiarenia na frekvencii mobilných telefónov (1,95 GHz) na chromozómové aberácie vyvolané röntgenovým žiarením v ľudských lymfocytoch in vitro. *Radiat. Res.* **169**, 575-583
<https://doi.org/10.1667/RR1044.1>
- Markkanen A, Penttinen P, Naarala J, Pelkonen J, Sihvonon AP, Juutilainen J (2004): Apoptóza vyvolaná ultrafialovým žiarením sa zvyšuje amplitúdovo modulovaným rádiovlnovým žiarením v mutovaných bunkách kvasiniek. *Bioelectromagnetics* **25**, 127-133
<https://doi.org/10.1002/bem.10167>
- McClelland S, Jaboin JJ (2018): The radiation safety of 5G Wi-Fi: Je to upokojujúce alebo ruská suleta? *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **101**, 1274-1275
<https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.04.051>
- McCredden JE, Cook N, Weller S, Leach V (2022): Bezdrôtové technológie sú environmentálnym stresorom, ktorý si vyžaduje nové chápanie a prístupy v zdravotnej starostlivosti. *Front. Public Health* **10**, 986315
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.986315>
- McCredden JE, Weller S, Leach V (2023): Predpoklad bezpečnosti sa používa na odôvodnenie zavádzania technológií 5G. *Front. Public Health* **11**, 1058454
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1058454>
- Melnick RL (2019): Commentary on the utility of the National Toxicology Program study on cell phone radiofrequency radiation data for assessing human health risks despite unfounded criticisms aimed at minimizing the findings of adverse health effects. *Environ. Res.* **168**, 1-6
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.010>
- Miller AB, Morgan LL, Udasin I, Davis DL (2018): V nadväznosti na hodnotenie rádiovlnových elektromagnetických polí IARC z roku 2011 (Monografia 102). *Environ. Res.* **167**, 673-683
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.043>
- Miller AB, Sears ME, Morgan LL, Davis DL, Hardell L, Oremus M, Soskolne CL (2019): Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices (Riziká pre zdravie a pohodu spôsobené rádiovlnovým žiarením vyžarovaným mobilnými telefónmi a inými bezdrôtovými zariadeniami). *Front. Public Health* **7**, 223 <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00223>
- Miller AB (2022): Dôsledky vystavenia elektromagnetickým poliám bezdrôtovej komunikácie na verejné zdravie. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biologické a zdravotné účinky*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL
<https://doi.org/10.1201/9781003201052-5>
- Neufeld E, Kuster N (2018): Systematické odvodenie bezpečnostných limitov pre časovo premenlivú expozíciu 5G rádiovlnovými na základe analytických modelov a tepelnej dávky. *Health Physics* **115**, 705-711
<https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000930>
- Nias AHW (1998): *Nias Nias Nias: Úvod do rádiobiológie*. John Wiley & Sons
- NTP (Národný toxikologický program) (2018): *Toxikologické štúdie a štúdie karcinogenézy u Hsd: potkanov Sprague Dawley SD vystavených celotelovému rádiovlnovému žiareniu s frekvenciou (900 MHz) a moduláciami (GSM a CDMA) používanými mobilnými telefónmi*, NTP TR 595. Ministerstvo zdravotníctva a ľudských služieb, USA
- Pall ML (2013): Elektromagnetické polia pôsobia prostredníctvom aktivácie napäťovo riadených vápnikových kanálov a vyvolávajú priaznivé alebo nepriaznivé účinky. *J. Cell. Mol. Med.* **17**, 958-965
<https://doi.org/10.1111/jcmm.12088>
- Pall ML (2018): Wi-Fi predstavuje významnú hrozbu pre ľudské zdravie. *Životné prostredie. Res.* **164**, 405-416
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035>
- Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarbounis A, Filippis AL, Margaritis LH (2000): A mechanism for action of oscillating electric fields on cells. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **272**, 634-640
<https://doi.org/10.1006/bbrc.2000.2746>
- Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Margaritis LH (2002): Mechanizmus pôsobenia elektromagnetických polí na bunky. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **298**, 95-102
[https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(02\)02393-8](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(02)02393-8)
- Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH (2007): Bunková smrť vyvolaná žiarením GSM 900 MHz a DCS 1800 MHz mo-bile telefónie. *Mutat. Res.* **626**, 69-78
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2006.08.008>
- Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Margaritis LH (2010): Bioeffects of mobile telephony radiation in relation to its intensity or distance from the antenna. *Int. J. Rad. Biol.* **86**, 345-357
<https://doi.org/10.3109/09553000903567961>
- Panagopoulos DJ, Margaritis LH (2010): Vplyv trvania expozície na biologickú aktivitu žiarenia mobilných telefónov. *Mutat. Res.* **699**, 17-22 <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.04.010>
- Panagopoulos DJ, (2012): Vplyv vystavenia mikrovlnnej rúre na vývoji ovárií drosophily melanogaster. *Cell. Biochem. Biophys.* **63**, 121-132
<https://doi.org/10.1007/s12013-012-9347-0>
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL (2013): Hodnotenie špecifickej miery absorpcie ako dozimetrickej veličiny pre biologické účinky elektromagnetických polí. *PLoS One* **8**, e62663 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062663>
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL (2015a): Skutočné verus simulované vystavenie mobilným telefónom v experimentálnych štúdiách. *BioMed Res. Int.* **2015**, 607053
<https://doi.org/10.1155/2015/607053>
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL (2015b): Polarizácia: Kľúčový rozdiel medzi umelými a prírodnými elektromagnetickými poľami, pokiaľ ide o biologickú aktivitu. *Sci. Rep.* **5**, 14914 <https://doi.org/10.1038/srep14914>
- Panagopoulos DJ (2017): Vplyv žiarenia mobilných telefónov na ováriálne bunky hmyzu. Nevyhnutnosť hodnotenia bioaktivity reálnych expozícií. Kľúčová úloha polarizácie a mechanizmu iónovej nútenej oscilácie. In: *Rádiové žiarenie: Microwave Effects on DNA and Proteins (Účinky mikrovln na DNA a proteíny)*. (Ed. CD Geddes), Springer, Cham, Švajčiarsko, 1-48 https://doi.org/10.1007/978-3-319-50289-2_1

- Panagopoulos DJ (2019a): Chromozómové poškodenie v ľudských bunkách vyvolané žiarením mobilnej telefónie UMTS. *Gen. Physiol. Biophys.* **38**, 445-454
https://doi.org/10.4149/gpb_2019032
- Panagopoulos DJ (2019b): Porovnanie poškodenia DNA spôsobeného mobilnou telefóniou a inými typmi človekom vytvorených elektromagnetických polí. *Mutat. Res. Rev.* **781**, 53-62 <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2019.03.003>
- Panagopoulos DJ (2020): Porovnanie poškodenia chromozómov spôsobeného žiarením mobilných telefónov a vysokou dávkou kofeínu: Vplyv kombinácie a trvania expozície. *Gen. Physiol. Biophys.* **39**, 531-544
https://doi.org/10.4149/gpb_2020036
- Panagopoulos DJ (2021): Pripomienky k Pallovej práci "Milimetrové (MM) vlny a mikrovlnné žiarenie vyvolávajú hlboko prenikavé účinky: biológia a fyzika". *Rev. Environ. Zdravie* **37**, 295-297
<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0090>
- Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos GP (2021): Human-made electromagnetic fields: Iónové vynútené oscilácie a dysfunkcia napäťovo riadených iónových kanálov, oxidačný stres a poškodenie DNA. *Int. J. Oncol.* **59**, 92 <https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>
- Panagopoulos DJ (2022a): Poškodenie DNA a chromozómov v ľudských a živočíšnych bunkách vyvolané elektromagnetickými poľami mobilných telefónov a inými stresormi. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-8>
- Panagopoulos DJ (2022b): Mechanizmus nútenej oscilácie iónov a dysfunkcie napäťovo riadených iónových kanálov vplyvom polarizovaných a koherentných elektromagnetických polí. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biologické a zdravotné účinky*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-16>
- Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Lioliousis C (2022a): Definovanie elektromagnetických polí (EMP) bezdrôtovej komunikácie (WC). In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-3>
- Panagopoulos DJ, Yakymenko I, Chrousos GP (2022b): Electromagnetic field-induced dysfunction of voltage-gated ion channels, oxidative stress, DNA damage, and related pathologies. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-17>
- Panagopoulos DJ (2023): *Elektromagnetické polia bezdrôtových komunikácií*. (1. vyd.). CRC Press, Boca Raton, FL
<https://doi.org/10.1201/9781003201052-1>
- Pantelias GE, Terzoudi GI (2010): Funkčné zmeny konformácie chromatinu v bunkovom cykle v prítomnosti poškodenia DNA vedú k chromatidovým zlomom. Nový pohľad na vznik chromozómových aberácií vyvolaných radiáciou na základe priameho pozorovania interfázneho chromatinu. *Mutat. Res.* **701**, 27-37
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.04.006>
- Pantelias GE, Terzoudi GI (2011): Štandardizovaný test G2 na predpovedanie individuálnej rádiosenzitivity. *Radiother. Oncol.* **101**, 28-34
<https://doi.org/10.1016/j.radonc.2011.09.021>
- Pesnya DS, Romanovsky AV (2013): Porovnanie cytotoxických a genotoxických účinkov alfa častíc plutónia 239 a žiarenia mobilného telefónu GSM 900 v teste *Allium cepa*. *Mutat. Res.* **750**, 27-33
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>
- Phillips JL, Singh NP, Lai H (2009): Elektromagnetické polia a poškodenie DNA. *Pathophysiology* **16**, 79-88
<https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2008.11.005>
- Poullietier de Gannes F, Haro E, Hurtier A, Taxile M, Ruffie G, Billaudel B, Veyret B, Lagroye I (2011): Vplyv vystavenia signálu z okraja na oxidačný stres v modeloch mozgových buniek. *Radiat. Res.* **175**, 225-230
<https://doi.org/10.1667/RR2320.1>
- Prasad KN (1995): *Príručka rádiobiológie* (2. vydanie). CRC Press, Boca Raton, FL
- Read R, O'Riordan T (2017): The precautionary principle under fire. *Environment Science and Policy for Sustainable Development* **59**, 4-15
<https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1350005>
- Schwarz C, Kratochvil E, Pilger A, Kuster N, Adlkofer F, Ruediger HW (2008): Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia (UMTS, 1 950 MHz) vyvolávajú genotoxické účinky in vitro v ľudských fibroblastoch, ale nie v lymfocytoch. *Int. Arch. Occup. Environ. Zdravie* **81**, 755-767
<https://doi.org/10.1007/s00420-008-0305-5>
- Sesia S, Toufih I, Baker M (2011): *LTE - Dlhodobá evolúcia UMTS*. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, UK
<https://doi.org/10.1002/9780470978504>
- Smith-Roe SL, Wyde ME, Stout MD, Winters JW, Hobbs CA, Shepard KG, Green AS, Kissling GE, Shockley KR, Tice RR, et al. (2020): Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following subchronic exposure. *Environ. Mol. Mutagen.* **1**, 276-290 <https://doi.org/10.1002/em.22343>
- Stronati L, Testa A, Moquet J, Edwards A, Cordelli E, Villani P, Marino C, Fresegna AM, Appolloni M, Lloyd D (2006): 935 MHz žiarenie mobilných telefónov. Štúdia genotoxicity in vitro v ľudských lymfocytoch. *Int. J. Radiat. Biol.* **82**, 339-346
<https://doi.org/10.1080/09553000600739173>
- Szilágyi Z, Németh Z, Bakos J, Kubinyi G, Necz PP, Szabó E, Thuróczy G, Pinto R, Selmaoui B (2023): Assessment of inflammation in 3D reconstructed human skin exposed to combined exposure to ultraviolet and Wi-Fi radiation (Hodnotenie zápalu v 3D rekonštruovanej ľudskej koži vystavenej kombinovanej expozícii ultrafialovému a Wi-Fi žiareniu). *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 2853
<https://doi.org/10.3390/ijms24032853>
- Terzoudi GI, Pantelias GE (2006): Cytogenetické metódy na biodiagnostiku a individualizáciu rizika po vystavení ionizujúcemu žiareniu. *Radiat. Prot. Dosimetry* **122**, 513-520
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncl509>
- Terzoudi GI, Hatzi VI, Donta-Bakoyianni C, Pantelias GE (2011): Chromatínová dynamika počas bunkového cyklu sprostredkúva premenu poškodenia DNA na chromatidové zlomy a ovplyvňuje vznik chromozomálnych aberácií: biologický a klinický význam. *Mutat. Res.* **711**, 174-186
<https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2010.12.011>

- Tian XL, Lu X, Feng JB, Cai TJ, Li S, Tian M, Liu QJ (2018): a ich vzťah k poškodeniu chromozómov v ľudských lymfoblastoidných bunkách. *Radiat. Environ. Biophys.* **57**, 215-222 <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0742-9>
- Wu GW, Liu XX, Wu MX, Zhao JY, Chen WL, Lin RH, Lin JM (2009): Experimentálna štúdia diferenciácie mezenchýmových kmeňových buniek kostnej drene a chondrocyty indukovanej milimetrovými vlnami. *Int. J. Mol. Med.* **23**, 461-467 https://doi.org/10.3892/ijmm_00000152
- Yakymenko I, Sidorik E, Kyrylenko S, Chekhun V (2011): Dlhodobé vystavenie mikrovlňnému žiareniu vyvoláva rast rakoviny: dôkazy z radarov a mobilných komunikačných systémov. *Exp. Oncol.* **33**, 62-70
- Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, Kyrylenko O, Kyrylenko S (2016): Oxidačné mechanizmy biologickej aktivity rádiovlnového žiarenia nízkej intenzity. *Electromagn. Biol. Med.* **35**, 186-202 <https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1043557>
- Yakymenko I, Burlaka A, Tsybulin I, Brieieva I, Buchynska L, Tsehmistrenko S, Chekhun V (2018): Oxidačné a mutagénne účinky mikrovlňného žiarenia GSM 1800 MHz s nízkou intenzitou. *Exp. Oncol.* **40**, 282-287 [https://doi.org/10.31768/2312-8852.2018.40\(4\):282-287](https://doi.org/10.31768/2312-8852.2018.40(4):282-287)
- Jakymenko I, Tsybulin O (2022a): Karcinogénne účinky netepelného vystavenia elektromagnetickým poliam bezdrôtovej komunikácie. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biologické a zdravotné účinky*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-12>
- Jakymenko I, Tsybulin O (2022b): Oxidačný stres vyvolaný elektromagnetickými poľami bezdrôtovej komunikácie. In: *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects*. (Ed. DJ Panagopoulos), CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL <https://doi.org/10.1201/9781003201052-6>
- Zeni O, Chiavoni AS, Sannino A, Antolini A, Forigo D, Bersani F, Scarfì MR (2003): Neexistencia genotoxických účinkov (indukcia mikrojadier) v ľudských lymfocytoch vystavených in vitro elektromagnetickým poľiam 900 MHz. *Radiat. Res.* **160**, 152-158 <https://doi.org/10.1667/RR3014>
- Zeni O, Sannino A, Romeo S, Massa R, Sarti M, Reddy AB, Prihoda TJ, Vijayalaxmi, Scarfì MR (2012): Indukcia adaptívnej reakcie v ľudských krvných lymfocytoch vystavených rádiovlnovým poliam: vplyv signálu univerzálneho mobilného telekomunikačného systému (UMTS) a špecifickej miery absorpcie. *Mutat. Res.* **747**, 29-35 <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.03.013>
- Zothansiana, Zosangzuali M, Lalramdinpuii M, Jagetia GC (2017): Vplyv rádiovlnového žiarenia na poškodenie DNA a antioxidanty v lymfocytoch periférnej krvi ľudí žijúcich v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov. *Electromagn. Biol. Med.* **36**, 295-305 <https://doi.org/10.1080/15368378.2017.1350584>

Prijaté: augusta 2023

Prijatá konečná verzia: novembra 2023