

Vplyv extrémne nízko-frekvenčného elektromagnetického poľa na ľudské bunky

Effect of Extremely Low-frequency Electromagnetic Field on Human Cells

Ivana Švantnerová¹, Jozef Babečka^{2,3}, Lucián Zastko^{4,5}

¹Katedra teoretickej elektrotechniky a biomedicínskeho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, Slovenská republika

²Katedra ošetrovateľstva, Fakulta zdravotníctva, Katolícka univerzita v Ružomberku, Ružomberok, Slovenská republika

³Klinika nukleárnej medicíny, Ústredná vojenská nemocnica SNP Ružomberok-FN, Ružomberok, Slovenská republika

⁴Katedra laboratórných vyšetrovacích metód v zdravotníctve, Fakulta zdravotníctva, Katolícka univerzita v Ružomberku, Ružomberok, Slovenská republika

⁵Oddelenie rádiobiológie, Ústav experimentálnej onkológie, Biomedicínske centrum Slovenskej akadémie vied, Bratislava, Slovenská republika

<https://doi.org/10.54937/zs.2024.16.2.32-38>

Abstrakt

Extrémne nízko-frekvenčné elektromagnetické polia (ENF EMP) predstavujú významný aspekt moderného technologického prostredia. Tento článok sumarizuje výskumy týkajúce sa vplyvu ENF EMP na ľudské bunky, pričom sa zameriava na rôzne aspekty ich biologických účinkov. Expozícia ENF EMP môže ovplyvniť rôzne bunkové procesy a funkcie, čo môže mať potenciálne zdravotné dôsledky vrátane neurodegeneratívnych ochorení, kardiovaskulárnych problémov, reprodukčných ťažkostí a nádorových ochorení. Hoci existujú náznaky negatívnych účinkov, stále je potrebné ďalšie vedecké skúmanie na presné určenie rozsahu a mechanizmov týchto účinkov. Výsledky naznačujú potrebu pokračujúceho monitorovania a vypracovania bezpečnostných smerníc na ochranu verejného zdravia pred potenciálnymi rizikami spojenými s ENF EMP.

KLúčové slová: Extrémne nízko-frekvenčné elektromagnetické polia. Lymfocyty. Karcinogenita.

Abstract

Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields (ELF EMF) represent a significant aspect of the modern technological environment. This article summarizes research on the impact of ELF EMF on human cells, focusing on various aspects of their biological effects. This review shows that exposure to ELF EMF can influence various cellular processes and functions, potentially leading to health consequences, including neurodegenerative diseases, cardiovascular issues, reproductive difficulties, and cancer. Although there are indications of negative effects, further research is needed to precisely determine the extent and mechanisms of these effects. The results suggest the need for ongoing monitoring and the development of safety guidelines to protect public health from potential risks associated with ELF EMF.

Keywords: Extremely-low frequency electromagnetic fields. Lymphocytes. Carcinogenity.

Úvod

V súčasnej modernej dobe sa stáva expozícia magnetickým poliám neoddeliteľnou súčasťou ľudského života. To vyvoláva otázky týkajúce sa ich bezpečnosti. Táto problematika sa za posledné roky dostala do popredia a vplyv elektromagnetických polí na ľudský organizmus je stále viac diskutovanou témou.

Cieľom tejto práce je zamerať sa na sumarizáciu najnovších poznatkov vplyvu extrémne nízko-frekvenčných elektromagnetických polí (ENF EMP) a ich účinkov na ľudské bunky. Hlavnými dôvodmi sú najmä možná súvislosť týchto polí s leukémiou, ktorá je dodnes rozsiahlo diskutovaná a taktiež fakt, že v roku 2002 Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) zaradila ENF EMP do skupiny 2B (potenciálne karcinogénne pre ľudí). Práve preto je veľmi dôležité venovať sa výskumu účinkov týchto polí na ľudské bunky.

Výsledky doterajších štúdií často prezentovali protichodné zistenia. Zatiaľ čo niektoré naznačujú možný vplyv ENF EMP na vznik dvojvláknových zlomov DNA a apoptózu, čo by mohlo poukazovať na ich genotoxický potenciál, iné štúdie tvrdia opak. Tieto rozdiely sú pravdepodobne spôsobené najmä odlišnými fyzikálnymi a biologickými parametrami použitými v jednotlivých prácach. Preto je dôležité optimalizovať experimentálne podmienky a porovnávať len výsledky, ktoré sú vzájomne porovnateľné.

Extrémne nízko-frekvenčné elektromagnetické polia

Extrémne nízko-frekvenčné elektromagnetické polia (ENF EMP) možno opísať ako neionizujúce elektromagnetické žiarenie v rozsahu 0 – 300 Hz. Najčastejšie sa ľudia dostávajú do kontaktu s EMP s frekvenciou 50 Hz. Spotrebiče v domácnosti ako napríklad elektrické sporáky, sušiče vlasov, vysávače, počítače a umývačky riadu sú zdrojom takýchto EM polí. Za posledné desaťročia sa vývoj technológií rapídne zvýšil a tým sa zvýšil aj styk ľudí s EM žiarením. Zdroje ENF EMP sa delia na dve skupiny: prírodné zdroje a umelé zdroje. Prírodné zdroje sú spojené s javmi v prírode ako sú napríklad blesky. Na druhej strane umelé zdroje tohto žiarenia sú vytvorené ľudskou činnosťou. Toto delenie pomáha pri správnom pochopení vplyvu ENF EMP na ľudské zdravie [1].

Medzi základné prírodné zdroje EMP sa radí magnetické pole Zeme. Pričom jeho frekvencie sa pohybujú okolo 0.5 Hz a amplitúda dosahuje hodnoty okolo 50 μ T. Ovplyvňuje rôzne procesy na Zemi, jedným z typických príkladov je navigácia vtákov a ďalších živočíchov. Iným typickým príkladom sú magnetické búrky. Ide o dočasné narušenie magnetického poľa Zeme, zapríčinené slnečnou aktivitou. Frekvencie, ktoré sú generované pri takýchto búrkach sa pohybujú okolo 0.1 – 10 Hz. Amplitúdy

môžu dosahovať hodnoty niekoľkých stoviek μT . Taktiež klasické búrkové oblaky generujú elektrické výboje, ktoré vytvárajú EM polia s frekvenciami v rozmedzí 1 – 10 kHz a amplitúdami až niekoľkých desiatok μT [2].

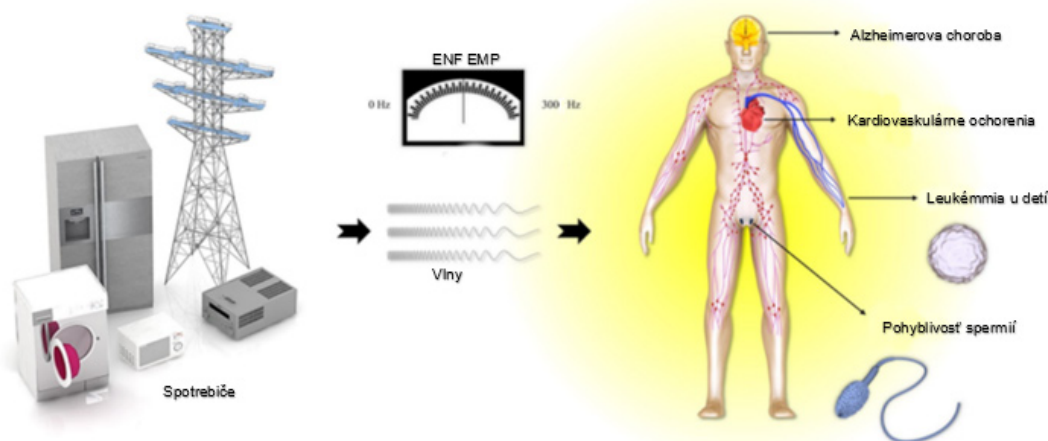
Pri umelých zdrojoch sú ENF EMP generované rôznymi zariadeniami a systémami. Patria sem napríklad domáce spotrebiče, elektrické vedenia, transformátory, mobilné telefóny a dopravné prostriedky. Väčšina ľudí je dennodenne vystavená práve týmto poliam, či už v domácnostiach, práci alebo vo vonkajšom prostredí.

Elektrické a magnetické polia obklopujú akékoľvek elektrické zariadenie. V blízkosti zdrojov sú polia silnejšie a

so zvyšujúcou sa vzdialenosťou ich intenzita klesá. Sú schopné prenikať cez väčšinu materiálov a preto môžu ovplyvňovať ľudské zdravie a životné prostredie.

Možné zdravotné dôsledky expozície ENF EMP

Sledovanie a porozumenie možných zdravotných dôsledkov je veľmi dôležité najmä v kontexte neustále sa rozvíjajúcej technológie a s tým spojenej narastajúcej expozície EMP (Obr. 1). V dnešnej dobe ide o neoddeliteľnú súčasť života a preto je nevyhnutné preskúmať ich potenciálny vplyv na ľudské zdravie.



Obr. 1 Vplyv ENF EMP na človeka. Adaptované z [3]

Nervový systém

V roku 1996 Eugene Sobel a jeho kolegovia prvýkrát popísali vplyv ENF MP na neurodegeneratívne choroby. Ich štúdia ukázala, že profesionálny kontakt s miernym až vysokým EMP bol významne spojený so zvýšeným rizikom vzniku Alzheimerovej choroby [3,4]. Výbor pre EMP Zdravotnej rady v Holandsku analyzoval vedecké údaje o možnom vzťahu medzi expozíciou magnetickým poliam generovaných elektrickými vedeniami a výskytom neurodegeneratívnych ochorení. Pričom sa zohľadňovali štúdie zamerané na expozíciu v obytných oblastiach a na pracovisku. Výbor dospel k záveru, že kauzálny vzťah medzi expozíciou magnetickým poliam a vývojom Parkinsonovej choroby je veľmi nepravdepodobný. Žiadna zo štúdií nepreukázala prepojenie medzi blízkosťou elektrických vedení v obytných zónach a vznikom tejto choroby. Toto platí aj pre amyotrofickú laterálnu sklerózu (ALS) a Alzheimerovu chorobu. Je potrebné poznamenať, že kvalita a rozsah tohto výskumu môže byť do istej miery obmedzená a preto je dôležitý ďalší výskum v tejto oblasti. Čo sa týka pracovných skupín, ktoré boli vystavené výrazne vyšším úrovňam expozície magnetických polí, existuje tu určité spojenie medzi expozíciou a rizikom vzniku ALS a Alzheimerovej choroby. Výbor označil toto spojenie za naznačujúce kauzálny vzťah [5].

Vzhľadom na nedostatočné množstvo štúdií by bolo predčasné úplne vylúčiť kauzálny vzťah medzi expozíciou magnetickým poliam a vznikom neurodegeneratívnych chorôb, preto je dôležité naďalej pokračovať vo výskumoch.

Kardiovaskulárny systém

Epidemiologické výskumy ukazujú, že expozícia ENF EMP ovplyvňuje variabilitu srdcového rytmu ako prediktívny marker určitých kardiovaskulárnych patológií [6]. V laboratórnych štúdiách sa zistilo, že po nočnej expozícii prerušovaným 60 Hz magnetickým poliam dochádza k zníženiu variability srdcového rytmu. Dlhodobej expozícii ENF MP je pripisované spojenie s akútnym infarktom myokardu a s úmrtiami v dôsledku arytmií [3,7]. Avšak spoločná analýza laboratórnych štúdií nepreukázala konzistentný vplyv na kardiovaskulárne parametre ako srdcový rytmus, variabilita srdcového rytmu a krvný tlak. V inej štúdií sa nepotvrdila žiadna súvislosť medzi profesionálnou expozíciou ENF MP a úmrtnosťou na kardiovaskulárne ochorenia, vrátane ischemickej choroby srdca, akútneho infarktu myokardu, arytmie, aterosklerózy a úmrtnosťou na cerebrovaskulárne ochorenia [3,8]. Na jednoznačné určenie resp. vylúčenie vplyvu ENF MP na kardiovaskulárny systém človeka je potrebný ďalší výskum.

Reprodukčný systém

Negatívne účinky ENF EMP na reprodukčný systém sú rozporné. Najnovšie štúdie naznačujú, že expozícia ENF EMP je negatívny faktor, pričom ženy vystavené ENF EMP počas tehotenstva majú vyššie riziko spontánneho potratu [9 – 12]. Taktiež používanie elektrických prikrývk a vyhrievaných vodných postelí u tehotných žien môže ovplyvniť vývoj plodu v dôsledku tepelných účinkov resp. EMP [13]. Napriek tomu, účinky ENF EMP na rast a vývoj plodu počas ľudského tehotenstva ešte neboli úplne objasnené [14 – 16]. Vystavenie

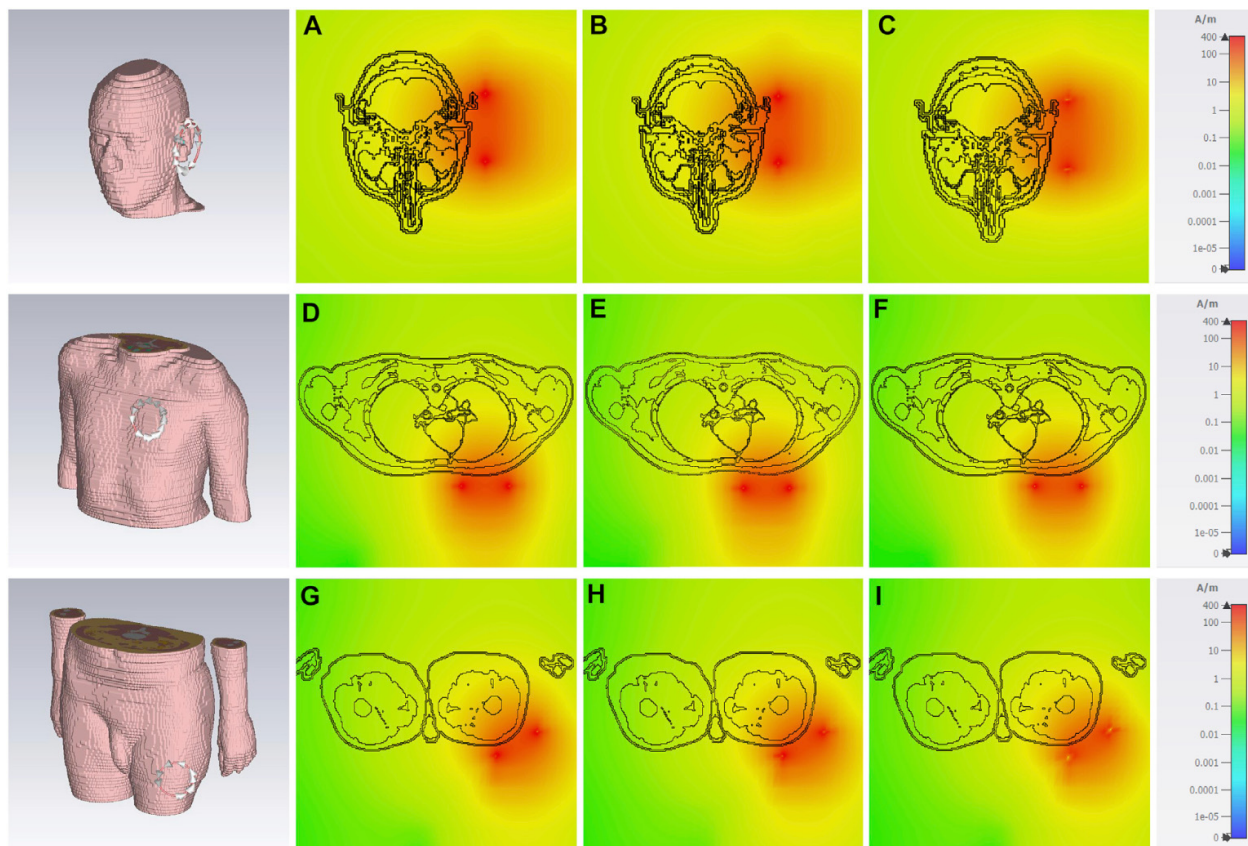
ENF EMP môže v závislosti od charakteristík poľa zvýšiť pohyblivosť spermii [17]. Ale nedávna štúdia poukazuje na to, že používanie notebookov umiestnených na kolenách môžu naopak, potenciálne znížiť pohyblivosť spermii, či už v dôsledku kumulovaného tepla alebo EMP [18].

Nádorové ochorenia

Mnoho štúdií sa zameriava na účinky ENF EMP na nádorové ochorenia. Ide o ochorenia, ktoré sa vyskytujú u ľudí čoraz častejšie, a preto je dôležité identifikovať možné príčiny ich vzniku a minimalizovať ich vplyv na ľudské zdravie.

Mobilné telefóny

Jednou z najviac používaných moderných technológií sú práve mobilné telefóny, ktoré tvoria pre mnohých ľudí neoddeliteľnú súčasť života. Mobilné telefóny neslúžia len na komunikáciu, ľudia ich využívajú dlhé hodiny ako voľnočasovú aktivitu alebo ich používajú pri práci. Vzhľadom na tieto skutočnosti boli publikované štúdie, ktoré sa zaoberajú vplyvom ENF EMP z mobilných telefónov na ľudské zdravie. Pri telefonovaní je významná časť hlavy a mozgu vystavená týmto poliam (Obr. 2).



Obr. 2 Simulácia rozloženia ENF MP v ľudskom tele. Najvyššia nameraná hodnota ($70.03 \mu\text{T}$) bola stanovená ako „worst case scenario“ pre každú simulovanú oblasť. Prvý riadok (A–C) zobrazuje rozloženie poľa v hlave, druhý riadok (D–F) zobrazuje rozloženie poľa v hrudníku, a tretí rad (G–I) zobrazuje rozloženie poľa v oblasti panvy. Prvý stĺpec zobrazuje umiestnenie cievky a druhý, tretí a štvrtý stĺpec zobrazuje výsledky pre 10 Hz, 50 Hz a 200 Hz. Adaptované z [19].

V jednej zo štúdií boli merané ENF EMP z mobilných telefónov v 3 režimoch: pohotovostnom, hovorovom a počúvanom pre štandardy 2G a 3G. Použité boli dve frekvenčné pásma: prvé malo hodnoty 5 Hz – 200 Hz a druhé 120 Hz – 10 kHz. Najvyššia nameraná hodnota magnetického poľa bola $70.03 \mu\text{T}$ pri frekvenciách 5 Hz – 200 Hz (2G režim hovorenia, predná strana) a $12.67 \mu\text{T}$ pri frekvenciách 120 Hz – 10 kHz (2G režim hovorenia, predná strana). Treba poukázať na to, že tieto hodnoty sú ekvivalentné s tými, ktoré sa považujú za schopné vyvolať biologické a zdravotné dôsledky, vrátane tých, ktoré sú spojené so vznikom nádorových ochorení. Výsledky tejto štúdie poukazujú na možnú súvislosť medzi ENF EMP z mobilných telefónov a karcinogénou u ľudí, ktorí sú týmto poliam vystavení [19].

Spotrebiče v domácnosti a leukémia u detí

Mnohé štúdie poukázali na možné spojenie medzi detskou leukémiou a ENF MP, ktoré sú generované elektrickými vedeniami a rôznymi elektrickými spotrebičmi. Toto spojenie bolo potvrdené systematickým prehľadom a metaanalýzou, ktoré objasnili vzťah medzi ENF MP z rôznych zdrojov a detskou leukémiou. Zistilo sa, že prahová hodnota magnetického poľa spojená s leukémiou u detí je vyššia ako $0.4 \mu\text{T}$, pričom pri nižších hodnotách nebol súvis potvrdený. Výskum tiež naznačuje, že dlhodobá expozícia elektrickým spotrebičom, ktoré generujú magnetické polia vyššie ako $0.4 \mu\text{T}$, ako sú napríklad elektrické deky, je spojená s vyšším rizikom leukémie v detstve [20].

Prehľad publikovaných prác a výskumov týkajúcich sa vplyvu ENF EMP na ľudské bunky

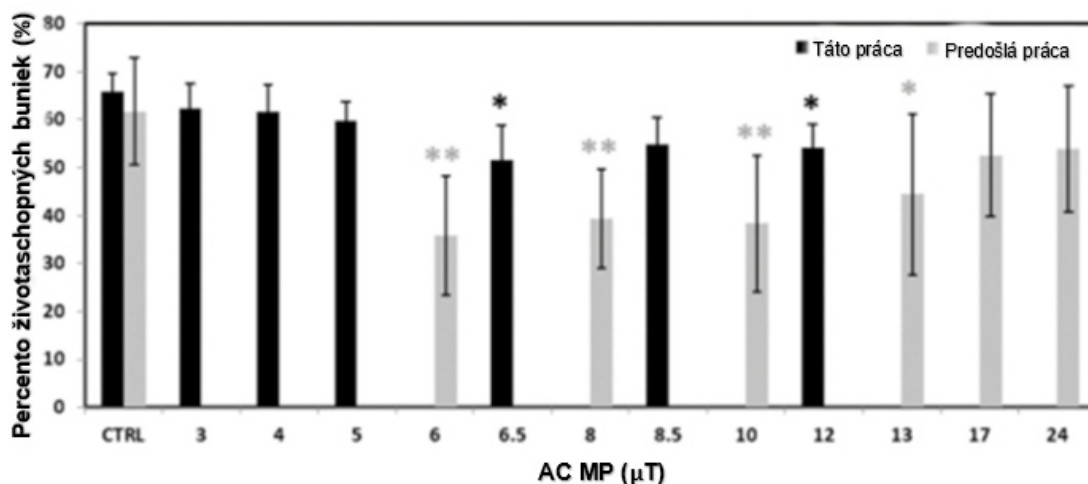
Pre lepšie porozumenie vplyvu ENF EMP na zdravie človeka je dôležité zamerať sa na výskum v oblasti vplyvu týchto poľí na ľudské bunky. Štúdium reakcií bunkových štruktúr a procesov na pôsobenie ENF EMP môže poskytnúť hlbší náhľad do možných mechanizmov, cez ktoré tieto polia ovplyvňujú biologické systémy. Tento výskum môže identifikovať potenciálne riziká na ľudské zdravie a poskytnúť dôležité informácie na základe ktorých môžu byť formulované bezpečnostné smernice a opatrenia týkajúce sa vystavenia ENF EMP.

Lymfocyty a ENF EMP

Jedna zo štúdií z roku 2020 hovorila o dôležitosti výskumu vplyvu ENF EMP vzhľadom na možnú súvislosť medzi leukémiou a ENF EMP. Štúdia bola zameraná na vplyv ENF EMP konkrétne na lymfocyty z pupočníkovej krvi novorodencov. Výsledky naznačujú, že amplitúda poľí môže ovplyvniť ich účinnosť, pričom určité amplitúdové okná vykazujú väčšie

účinky. Štúdia tiež ukazuje, že vystavenie prerušovaným ENF MP môže mať genotoxické účinky na krvné bunky. Aj keď výsledky týkajúce sa účinnosti amplitúdy ENF MP nepredstavujú úplné amplitúdové okno, naznačujú horný limit takéhoto okna (cca 13 μ T). Výsledky podporujú potrebu ďalšieho výskumu s dôrazom na rôzne amplitúdy MP. Výskum tiež poukazuje na biologickú relevantnosť prvej Schumannovej rezonancie a zdôrazňuje potrebu ďalšieho skúmania tejto oblasti [21].

Následne v roku 2022 bola publikovaná štúdia, ktorá nadväzuje na predchádzajúcu štúdiu z roku 2020. V tejto štúdii sa naďalej testovala hypotéza vplyvu ENF EMP na lymfocyty z pupočníkovej krvi novorodencov, pričom sa pokračovalo so zisteniami z minulej štúdie, kde bolo opísané, že účinky sa prejavili len pri amplitúdach pod 13 μ T, čo naznačovalo existenciu amplitúdového okna. V tomto článku bolo opísané zistenie, že prerušované ENF MP nemali štatisticky významný vplyv na časné apoptotické alebo neskoro apoptotické/nekrotické bunky, ani na produkciu reaktívnych kyslíkových druhov (ROS). Avšak percento životaschopných buniek sa znížilo pri expozícii poľiam s intenzitami 6.5 μ T a 12 μ T.



Obr. 3 Percento životaschopných buniek po 72 h expozícii lymfocytov ENF MP. Adaptované z [22].

Tieto výsledky spolu s predchádzajúcimi poukazujú na existenciu amplitúdového okna medzi 6 μ T a 13 μ T. Taktiež sa zistilo, že tento pokles životaschopnosti bol približne o 20 % pre 6.5 μ T a 12 μ T, čo poskytlo dôkaz o amplitúdovom okne v tejto oblasti. Na Obr. 3 sú zobrazené výsledky z oboch štúdií, ktoré ukazujú, že amplitúdové okno sa prejavuje v rozsahu 6 – 13 μ T [22].

Ďalšia štúdia poukazuje na to, že existuje veľa výskumov zaoberajúcich sa nefrotoxicitou a neurotoxicitou Gd (gadolinium-kontrastné činidlo pri magnetickej rezonancii), ale výskum o cyto- a genotoxicite v ľudských lymfocytoch je zriedkavý. Poukazuje na dôležitosť skúmania účinkov ENF EMP na toxicitu Gd, pretože pacienti sú súčasne vystavení Gd a ENF EMP generovaným magnetickej rezonanciou. Táto štúdia sa zaoberá skúmaním cytotoxicity a genotoxicity Gd a je zameraná na možný zosilňujúci účinok ENF EMP na toxicitu Gd v kultivovaných ľudských lymfocytoch pomocou testu mikrojadier, vylúčenia farbiva - trypanová modrá, elektroforézy jednotlivých buniek a analýzy apoptózy pomocou prietokovej cytometrie. Lymfocyty boli vystavené samotnému Gd (0.2 – 1.2 mM) alebo v kombinácii s ENF EMP (60 Hz, 0.8 mT). Toto vystavenie zapríčinilo pokles životaschopných buniek. Výsledky tejto štúdie načrtli, že Gd zapríčiňuje poškodenie DNA a taktiež apoptotickú bunkovú

smrť v ľudských lymfocytoch. Ďalej naznačujú, že ENF EMP zvyšuje cytotoxicitu a genotoxicitu Gd [23].

Ďalší článok hovorí o tom ako ENF MP vykazujú rezonančné účinky na ľudské lymfocyty. Tieto účinky sa prejavujú v určitých frekvenčných oknách okolo 8 a 58 Hz. Zaujímavé je, že tieto účinky sa líšili medzi skúmanými darcami lymfocytov, ale boli spoľahlivo reprodukovateľné v nezávislých experimentoch s lymfocyty od tých istých darcov. To naznačuje, že reakcia lymfocytov na ENF EMP je individuálna, ale zároveň konzistentná u jedného jedinca. Tieto poznatky poukazujú na komplexné vzťahy medzi magnetickej poliami a biologickými systémami, pričom genotyp buniek a prítomnosť biologicky dôležitých iónov ako Na, K, Ca, Mg a Zn zohrávajú dôležitú úlohu. Experimenty naznačujú, že frekvencie harmonických aj subharmonických rezonancií týchto iónov sa podieľajú na frekvenčne závislých účinkoch ENF MP na bunky rôznych typov, vrátane lymfocytov. Tieto zistenia majú význam pre lepšie porozumenie interakcií medzi magnetickej poliami a biologickými procesmi v bunkách [24].

Existuje štúdia kde bola použitá technika in vitro na testovanie vplyvu ENF EMP na ľudské periférne krvné lymfocyty pomocou výmeny sesterských chromatíd. Experimenty boli

vykonané na lymfocytoch pochádzajúcich od šiestich zdravých mužov, aby sa určila reprodukovateľnosť výsledkov. Lymfocyty boli vystavené 50 Hz sínusovým alebo obdĺžnikovým EMP s intenzitami poľa 1 mT počas 72 hodín. Výsledky ukázali významné zvýšenie frekvencie sesterských chromatíd v experimentálnych skupinách v porovnaní s kontrolami, pričom najvyššia frekvencia sesterských chromatíd bola zaznamenaná pri použití obdĺžnikového kontinuálneho poľa. Predpokladá sa, že mechanizmus spojený so skrížením DNA pri replikačnej vidlici môže vysvetliť zvýšenú frekvenciu sesterských chromatíd v reakcii na expozíciu ENF EMP [25].

Ďalší článok sa venoval tomu, ako ENF EMP o frekvencii 60 Hz a sily poľa 0.8 mT ovplyvňuje vznik mikrojadier a výmenu sesterských chromatíd (SCE) v ľudských lymfocytoch, ktorú indukuje benzo(a)pyren (BP). Toto pole bolo aplikované samotne alebo v kombinácii s BP, ktorý slúži ako iniciátor nádoru, a to počas 24-hodinovej expozície. Zistilo sa, že s rastúcou dávkou BP sa zvyšovala aj frekvencia mikrojadier a SCE. Keď boli bunky vystavené kombinácii BP a ENF EMP s intenzitou 0.8 mT na 24 hodín a potom iba BP na ďalších 48 hodín, došlo k významnému zvýšeniu frekvencie mikrojadier a SCE v porovnaní s ošetrením len BP na 72 hodín ($p < 0.05$). Medzi bunkami vystavenými EMP a kontrolnými bunkami bez expozície však nebol zaznamenaný žiadny významný rozdiel. Výsledky naznačujú, že ENF EMP s nízkou hustotou môže zosilňovať začiatkový proces pôsobenia BP, namiesto toho, aby pôsobil ako priamy iniciátor mutagénnych efektov na ľudské lymfocyty [26].

V nasledujúcej štúdii bol skúmaný vplyv in vitro expozície extrémne nízko-frekvenčnými pulznými elektromagnetickými poľami (PEMP) na proliferáciu ľudských lymfocytov. Lymfocyty pochádzali od 24 jedincov mladšej generácie a 24 jedincov staršej generácie. Expozícia PEMP počas trojdňového obdobia kultivácie a taktiež počas prvých 24 hodín mala schopnosť zvýšiť proliferáciu lymfocytov indukovaných fytohemaglutinínom v oboch skupinách. Tento účinok bol výraznejší u lymfocytov starších jedincov, ktorí mali výrazne obmedzenú schopnosť proliferácie a po expozícii PEMP dosiahli hodnoty inkorporácie 3H-TdR podobné tým u mladých jedincov. Tieto zistenia môžu pomôcť chápaniu možných účinkov expozície PEMP na bunkovú proliferáciu pri starších jedincoch, taktiež môžu prispieť k lepšiemu posúdeniu rizík, ktoré sú spojené s environmentálnou expozíciou EMP [27].

Karcinogenita a ENF EMP

Nádorové bunkové línie: glioblastóma: U251, línia karcinómu prsníka: MDA-MB-231

Jeden z článkov, ktorý sa zaoberal vplyvom ENF MP na bunky poukazuje na to, že aj malé variácie parametrov expozície týmto poľami môžu výrazne ovplyvniť výsledky experimentov. Práca opisuje dôkaz koncepcie toho, ako nový systém cievok, umožňuje testovanie rôznych expozícií poľa v jednom experimente. Boli vykonané testy na nádorových bunkových líniách U251 a MDA-MB-231, pričom boli testované rôzne časové modulácie a intenzity magnetických polí. Z práce vyplýva, že aj malé rozdiely v intenzite polí môžu mať štatisticky významné vplyvy na bunkovú proliferáciu. Výsledky tejto štúdie poukazujú na dôležitosť jemného prechodu cez rôzne amplitúdy polí pri vyhodnocovaní ich vplyvu na bunkové štruktúry a poskytuje dôkaz o koncepcii systému, ktorý znižujú čas a náklady na skrining [28].

Adenokarcinóm: MCF-7, línia karcinómu prsníka: MDA-MB-231, benígna línia epiteliálnych buniek prsníka: M10

Cieľ nasledujúcej štúdie je opísaný ako charakteristika účinkov špecifických pulzujúcich EMP na in vitro rast adenokarcinómu MCF-7 a buniek karcinómu prsníka MDA-MB-231 a na nezhubnú epiteliálnu bunku prsníka M10. Skúmali sa 4 významné parametre ENF EMP: frekvencia (7.83 ± 0.3 , 23.49 ± 0.3 a 39.15 ± 0.3 Hz), hustota toku (0.5 a 1 mT), dĺžka expozície (12.24 a 48 h) a metóda expozície (kontinuálna expozíciu v porovnaní s intermitentnou expozíciou). Životaschopnosť buniek MDA-MB-231 vystavených optimalizovanému vzoru ENF EMP (7.83 ± 0.3 Hz, 1 mT a 6 h intermitentnej expozície) bola 40.1 %. Naopak, optimalizované parametre ENF EMP, ktoré boli najcitlivejšie voči karcinómu prsníka MDA-MB-231, nespôsobili poškodenie normálnych buniek M10. In vitro štúdie ďalej preukázali, že expozícia buniek MDA-MB-231 optimalizovanému vzoru ENF EMP podporovala prívod Ca^{2+} a viedla k apoptóze. Údaje v tejto štúdii potvrdzujú, že expozícia uvedenému konkrétnemu vzoru ENF EMP môže ovplyvniť bunkové procesy a inhibovať rast nádorových buniek. Určený špecifický vzor ENF EMP v tejto štúdii by mohol predstavovať potenciálnu pomoc pri liečbe nádorových ochorení v budúcnosti [29]. Jedna zo štúdií venovala pozornosť vplyvu ENF EMP na biologické vlastnosti buniek karcinómu prsníka. Výskum analyzoval zmeny v nádorových bunkách prsníka MDA-MB-231 po expozícii ENF MP s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 1 mT počas 4 hodín. Zistilo sa, že bunky karcinómu prsníka prejavili zvýšenú životaschopnosť a počet živých buniek po expozícii ENF MP. Taktiež sa pozorovala zmena morfológie buniek a zvýšenie hladín ROS v mitochondriách. Bunky MDA-MB-231 prejavili po expozícii ENF MP zmeny vo svojich adhézných vlastnostiach, znížili sa. Naopak schopnosť migrácie a invázie sa zvýšila [35].

Ľudské cervikálne karcinómové bunky: HeLa a bunky IMR-90

Ďalšia štúdia sa odvoláva na výskum, ktorý ukázal, že gradientné EMP s intenzitou 6 mT a frekvenciou 60 Hz môžu vyvolávať genotoxické účinky. Vzhľadom na tieto výsledky sa rozvinula ďalšia štúdia, ktorá pracovala s jednotným EMP. Ukázalo sa, že jednorazová alebo opakovaná expozícia ENF EMP (6 mT, 60 Hz) nevyvoláva poškodenie DNA ani negatívne neovplyvňuje bunkovú životaschopnosť u nádorových buniek HeLa a fibroblastov IMR-90. Napriek tomu kontinuálna expozícia týchto buniek EMP podporovala bunkovú proliferáciu. Životaschopnosť buniek HeLa sa zvýšila o 24.4 % a pri bunkách IMR-90 o 15.2 %, pričom celková expozícia predstavovala 168 hodín. Nárast bunkovej proliferácie bol priamo spojený s intenzitou EMP a dĺžkou expozície. Po ukončení pôsobenia EMP bunky prestali rásť, čo naznačuje reverzibilitu tohto efektu. Výsledky tiež ukázali, že expozícia ENF EMP vedie k zníženiu hladiny reaktívnych foriem kyslíka (ROS) a zvýšeniu bunkovej proliferácie prostredníctvom fosforylácie proteínov Akt a Erk1/2. Z toho vyplýva, že znížené hladiny intracelulárnych ROS zohrávajú úlohu pri zvýšenej proliferácii. Tieto zistenia poukazujú na to, že jednotnosť ENF EMP je dôležitým faktorom v bunkových účinkoch a že tento typ expozície môže ovplyvňovať bunkovú proliferáciu ľudských nádorových aj normálnych buniek prostredníctvom redukcie hladín intracelulárnych ROS [30].

Účinky ENF EMP sa stále pokladajú za veľmi kontroverzné, pretože ich biologické účinky sú nekonzistentné. Na jednej strane preukázali genotoxické účinky a inhibovali proliferáciu [31,32] ale na druhej strane aktivovali proliferáciu pri hojení rán [33,34]. Pre tieto nezhody zatiaľ neexistuje vysvetlenie, ale dá sa predpokladať, že existuje určitý prehliadaný parameter, ktorý má veľký význam pri modulovaní účinkov EMP na bunky [30].

Záver

Vplyv extrémne nízko-frekvenčných elektromagnetických polí na ľudské bunky je komplexná téma s mnohými otvorenými otázkami. Výskumy naznačujú rôzne biologické efekty týchto polí, ktoré môžu ovplyvniť bunkové funkcie a procesy, čo môže mať následne vplyv na zdravie človeka. Doterajšie štúdie poukazujú na možnú súvislosť medzi ENF EMP a rôznymi zdravotnými problémami vrátane neurodegeneratívnych ochorení, kardiovaskulárnych ochorení, reprodukčných problémov a nádorových ochorení. Zistenia z experimentov s lymfocytmi a inými bunkovými typmi poskytujú cenné informácie, ale zároveň poukazujú na potrebu ďalšieho výskumu pre priblíženie mechanizmov a účinkov ENF EMP. Prepracovanie doposiaľ platných bezpečnostných smerníc tak, aby sa minimalizovali potenciálne riziká spojené s expozíciou týmto poliam, bude v blízkej budúcnosti taktiež nevyhnutné.

Referencie

- [1] Calvente, I., Dávila-Arias, C., et al. Characterization of indoor extremely low frequency and low frequency electromagnetic fields in the INMA-Granada cohort [online]. 2014. Available from: Journals. Accessed January 20, 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106666>
- [2] Klimek, A., Rogalska, J. Extremely Low-Frequency Magnetic Field as a Stress Factor—Really Detrimental?—Insight into Literature from the Last Decade [online]. Brain Sci. 2021. Available from: <https://doi.org/10.3390/brainsci11020174>. Accessed January 20, 2024.
- [3] Karimi, A., Ghadiri Moghaddam, F. & Valipour, M. Insights in the biology of extremely low-frequency magnetic fields exposure on human health. Mol Biol Rep 47, 5621–5633 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11033-020-05563-8>
- [4] Sobel, E., Davanipour, Z. Electromagnetic field exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease [online]. Neurology. 1996. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8960756/>. Accessed January 20, 2024. <https://doi.org/10.1212/WNL.47.6.1594>
- [5] Health Council of the Netherlands. Power lines and health: neurodegenerative diseases. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2022. 5s.
- [6] McNamee, D., Legros, A., et al. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields [online]. 2009. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00420-009-0404-y>. Accessed January 23, 2024.
- [7] Sastre, A., Cook, M. R., Graham, C. Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm [online]. 1998. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9492166/>. Accessed January 23, 2024. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1998\)19:2<98::AID-BEM7>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1998)19:2<98::AID-BEM7>3.0.CO;2-Z)
- [8] Koeman, T., Slotje, P., et al. Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and cardiovascular disease mortality in a prospective cohort study [online]. Occup Environ Med. 2013. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23322917/>. Accessed January 23, 2024. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-100889>
- [9] Lee, G. M., Neutra, R. R., et al. A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages [online]. Epidemiology. 2002. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11805582/>. Accessed January 23, 2024. <https://doi.org/10.1097/00001648-200201000-00005>
- [10] Hardell, L., Sage, C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards [online]. Biomed Pharmacother. 2008. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18242044/>. Accessed January 25, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2007.12.004>
- [11] Wang, Q., Cao, Z., et al. Residential exposure to 50 Hz magnetic fields and the association with miscarriage risk: a 2-year prospective cohort study [online]. PLoS One. 2013. Accessed January 25, 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082113>
- [12] Mahmoudabadi, F. S., Ziaei, S., et al. Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields during pregnancy and the risk of spontaneous abortion: a case-control study [online]. J Res Health Sci. 2013. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24077469/>. Accessed January 25, 2024.
- [13] Wertheimer, N., Leeper, E. Possible effects of electric blankets and heated waterbeds on fetal development [online]. Bioelectromagnetics. 1986. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3729998/>. Accessed January 25, 2024. <https://doi.org/10.1002/bem.2250070103>
- [14] Migault, L., Garlantézec, R., et al. Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields, prematurity and small for gestational age: a pooled analysis of two birth cohorts [online]. Occupational and Environmental Medicine. 2020. Accessed January 25, 2024. <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105785>
- [15] Migault, L., Piel, C., et al. Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and pregnancy outcomes in the Elfe cohort [online]. Environment International. 2018. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412017314137?via%3Dihub>. Accessed January 27, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.025>
- [16] Mahrama, M., Ghazavi, M. The effect of extremely low frequency electromagnetic fields on pregnancy and fetal growth, and development [online]. Arch Iran Med. 2013. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23496365/>. Accessed January 27, 2024.
- [17] Iorio, R., Scrimaglio, R., et al. A preliminary study of oscillating electromagnetic field effects on human spermatozoon motility [online]. Bioelectromagnetics. 2007. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17019728/>. Accessed January 27, 2024. <https://doi.org/10.1002/bem.20278>

- [18] Avedano, C., Mata, A., et al. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation [online]. *Fertil Steril*. 2012. Accessed January 27, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.10.012>
- [19] Misek, J., Jakus, J., et al. Extremely low frequency magnetic fields emitted by cell phones [online]. *Front. Phys.* 2023. Accessed January 27, 2024. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1094921>
- [20] Brabant, C., Geerinck, A., et al. Exposure to magnetic fields and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis of case-control and cohort studies [online]. *Reviews on Environmental Health*. 2023. Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/reveh-2021-0112/html>. Accessed January 27, 2024. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0112>
- [21] Zastko, L., Makinistian, L., et al. Effect of intermittent ELF MF on umbilical cord blood lymphocyte [online]. *Bioelectromagnetics*. 2020. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33190314/>. Accessed February 5, 2024. <https://doi.org/10.1002/bem.22302>
- [22] Zastko, L., Makinistian, L., et al. Intermittent ELF-MF Induce an Amplitude-Window Effect on Umbilical Cord Blood Lymphocytes [online]. *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Accessed February 5, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms232214391>
- [23] Cho, Y. H., Chung, H. W. The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a) pyrene [online]. *Toxicology Letters*. 2003. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378427403001115?via%3Dihub>. Accessed February 5, 2024. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(03\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(03)00111-5)
- [24] Belyaev, I., Alipov, E. D. Frequency-dependent effects of ELF magnetic field on chromatin conformation in *Escherichia coli* cells and human lymphocytes [online]. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2001. Available from: https://www.researchgate.net/publication/11930301_Frequency-dependent_effects_of ELF_magnetic_field_on_chromatin_conformation_in_Escherichia_coli_cells_and_human_lymphocytes. Accessed February 8, 2024. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(01\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(01)00138-6)
- [25] Wahab, M. A., Podd, J. V. Elevated sister chromatid exchange frequencies in dividing human peripheral blood lymphocytes exposed to 50 Hz magnetic fields [online]. *Bioelectromagnetics*. 2007. Accessed February 8, 2024. <https://doi.org/10.1002/bem.20289>
- [26] Cho, Y. H., Hai, W. Ch. The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a)pyrene [online]. *Toxicology Letters*. 2003. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378427403001115?via%3Dihub>. Accessed February 5, 2024. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(03\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(03)00111-5)
- [27] Cossarizza, A., Monti, D., et al. Extremely low frequency pulsed electromagnetic fields increase cell proliferation in lymphocytes from young and aged subjects [online]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 1989. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0006291X89924881?via%3Dihub>. Accessed February 5, 2024. [https://doi.org/10.1016/0006-291X\(89\)92488-1](https://doi.org/10.1016/0006-291X(89)92488-1)
- [28] Makinistian, L., Marková, E. A high throughput screening system of coils for ELF magnetic fields experiments: proof of concept on the proliferation of cancer cell lines [online]. *BMC Cancer*. 2019. Accessed February 5, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12885-019-5376-z>
- [29] Wang, M. H., Chen, K. W. Effect of extremely low frequency electromagnetic field parameters on the proliferation of human breast cancer [online]. *Electromagn Biol Med*. 2021. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33632057/>. Accessed February 5, 2024. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1891093>
- [30] Song, K., Sang, H. I., et al. A 60 Hz uniform electromagnetic field promotes human cell proliferation by decreasing intracellular reactive oxygen species levels [online]. *PLoS One*. 2018. Accessed February 5, 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199753>
- [31] Ivancsits, S., Diem, E., et al. Induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields in human diploid fibroblasts [online]. *Mutat Res*. 2002. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12160887/>. Accessed February 10, 2024. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(02\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(02)00109-2)
- [32] Lai, H., Singh, N. P. Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells [online]. *Bioelectromagnetics*. 1997. Accessed February 10, 2024. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:2<156::AID-BEM8>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:2<156::AID-BEM8>3.0.CO;2-1)
- [33] Costin, G. E., Birlea, S. A., et al. Trends in wound repair: cellular and molecular basis of regenerative therapy using electromagnetic fields [online]. *Curr Mol Med*. 2012. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22082478/>. Accessed February 10, 2024. <https://doi.org/10.2174/156652412798376143>
- [34] Cané, V., Botti, P., et al. Pulsed magnetic fields improve osteoblast activity during the repair of an experimental osseous defect [online]. *J Orthop Res*. 1993. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8410466/>. Accessed February 10, 2024. <https://doi.org/10.1002/jor.1100110508>
- [35] Lazzarini, R., Eléxpuru-Zabaleta, M. Effects of extremely low-frequency magnetic fields on human MDA-MB-231 breast cancer cells: proteomic characterization [online]. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114650>

Kontakt - Korešpondujúci autor:

RNDr. Lucián ZASTKO, PhD.
Fakulta zdravotníctva
Katolícka univerzita v Ružomberku
Námestie A. Hlinku 48
03401, Ružomberok
e-mail: lucian.zastko@ku.sk