Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

24-hodinová expozícia extrémne nízkofrekvenčnému elektromagnetickému poľu

Moduluje imunitné reakcie u potkanov

MARINA NIKOLAISHVILI[1], ALEKSANDRE TARKHNIŠVILI[1], KETEVAN PHEVADZE[1,2], DAVID NATADZE[1], KHATUNA DONDOLADZE[1,3]

[1]Laboratórium rádiobiológie, Experimentálne biomedicínske centrum I. Beritashviliho, 14, L. Gotua St., Tbilisi, 0160, GRUZÍNSKO

[2]Lekárska fakulta, Tbiliská štátna univerzita, I. Čavčavadzeho 1, Tbilisi, 0179, GRUZÍNSKO

[3]Lekárska fakulta, Európska univerzita, ul. D. Guramishvili 76, Tbilisi, 0441, GRUZÍNSKO

Abstrakt: -Skúmali sme imunitnú odpoveď vyvolanú 24-hodinovým kontinuálnym vystavením elektromagnetickému poľu (EMF) s ultranízkou frekvenciou u bielych potkanov. Experimentálnu skupinu bielych potkanov divokého typu sme umiestnili do špeciálnej cievky generujúcej elektromagnetické pole s intenzitou 2 mT pri frekvencii 50 Hz počas 24 hodín. Výsledky štúdie ukazujú, že po 24 hodinách kontinuálneho vystavenia elektromagnetickému poľu sa zaznamenal významný nárast plazmatickej koncentrácie draslíka zozbieraného z chvostových žíl potkanov (z 5,49 ± 0,46 na 13,07 ± 3,05 mmol/l). Zároveň sa percento bazofilov v krvi významne zvýšilo z 0,50 ± 0,09 na 1,03 ± 0,10 %, zatiaľ čo koncentrácia krvných doštičiek sa znížila zo 617,8 ± 15,2 ×10_9/L na 323,5 ± 114,5 × 10_9/L. Vysoká štandardná odchýlka biomarkerov imunitného systému nám umožňuje dospieť k záveru, že telo reaguje prostredníctvom zapojenia individuálnych mechanizmov.

Kľúčové slová: -Elektromagnetické pole, imunitný systém, kataláza, trombocyty, IL-1, IL-10, draslík.

Prijaté: 29. marca 2026. Revidované: 23. apríla 2026. Schválené: 29. mája 2026. Publikované: 6. októbra 2026.

1 Úvod

Moderní ľudia žijú v prostredí elektromagnetických polí. Elektromagnetické polia rôznych frekvencií a síl sa nachádzajú v domácom prostredí [1]. Mobilné telefóny, televízne antény, mikrovlnné rúry, zdravotnícke zariadenia a elektrické vozidlá generujú určité elektronické signály a vyžarujú ionizujúce alebo neionizujúce žiarenie [2].

Takéto žiarenie ovplyvňuje ľudské telo rôznymi spôsobmi a spôsobuje reverzibilné alebo ireverzibilné biologické zmeny [3]. Vykonávajú sa početné štúdie o biologických účinkoch žiarenia, takže jeho správne používanie a prínosy sa stávajú čoraz rozšírenejšími, hoci nesprávne poznatky alebo nadmerné vystavenie žiareniu zvyšuje riziko vzniku ochorení [4].

Žiarenie má viacero charakteristík a jeho účinky sú tiež rôzne. Napríklad rovnaká frekvencia neionizujúceho žiarenia môže byť charakterizovaná rôznymi vlnovými dĺžkami, energiami, intenzity atď. [5]. Prítomnosť týchto viacerých premenných znamená prítomnosť viacerých biologických účinkov, takže hoci základné mechanizmy pôsobenia žiarenia sú už dobre pochopené, určité kombinácie premenných parametrov spôsobujú rôzne zmeny v živých organizmoch a menia ich parametre rôznymi spôsobmi [6], [7], [8].

Je známe, že žiarenie vrátane neionizujúceho žiarenia, a to aj v nízkych dávkach, ovplyvňuje živé organizmy a môže narušiť homeostázu [9].

Ionizujúce žiarenie, ako sú röntgenové lúče, gama lúče, α, β a iné, poškodzuje biologické štruktúry.

Voľné radikály, ktoré vznikajú v dôsledku poškodenia bielkovín, lipidov a nukleových kyselín žiarením, majú následne deštruktívny účinok na biologické systémy. Toxické účinky neionizujúceho žiarenia (UV, RF, MF, EMG atď.) sa prejavujú prevažne zmenami membránového potenciálu a na rozdiel od reaktívnych foriem kyslíka (ROS) spôsobujú menej agresívne zmeny (napr. tepelné účinky atď.) [10], [11], [12].

V našej štúdii sme sa zamerali na skúmanie zmien v imunitnej odpovedi spôsobených 24-hodinovým nepretržitým vystavením neionizujúcemu žiareniu, konkrétne elektromagnetickým poliam s ultranízkou frekvenciou (ULF-EMF).

Vo všeobecnosti možno stres, ak sa s ním telo dokáže vyrovnať, považovať za pozitívny, pretože sa stáva odolnejším a tolerantnejším voči nemu [13]. V prípade žiarenia a v toxikológii všeobecne sa tento typ stresu a výsledná reakcia nazývajú horméza. Hormetický účinok sa vzťahuje na reakciu na stres, ako je žiarenie, posilnením antioxidačných systémov tela. Inými slovami, horméza sa vzťahuje na „posilnenie" tela stresom [14], [15].

Táto koncepcia je však medzi vedcami kontroverzná [16], pretože keď je narušená rovnováha medzi oxidačným a antioxidačným systémom, existuje vysoké riziko, že imunitný systém už nebude schopný zvládať stres [17], čo znamená, že sa v tele môžu vyvinúť rôzne patologické procesy [18]. Okrem toho, keďže presná hranica medzi hormézou a nástupom patologickej reakcie nie je známa, je ťažké povedať, či je horméza jednou z reakcií imunitného systému, ktorá trvá relatívne dlho, alebo prechodným štádiom, alebo jedným z typov imunitných odpovedí, po ktorých nasleduje štandardná imunitná odpoveď [19]. Rozdiely v reakciách tela teda naznačujú, že imunitný systém reaguje na stres rôznymi špecifickými a nešpecifickými reakciami vrátane pôsobenia ELF-EMF [20]. Odpoveď závisí od viacerých faktorov, a to od stavu tela (hmotnosť, vek, stabilita imunitného systému, stav antioxidačného systému, sprievodné ochorenia atď.) [21], ako aj od fyzikálnych charakteristík ENF-EMF, ako je trvanie pôsobenia, energia, vlnová dĺžka atď. [22], [23].

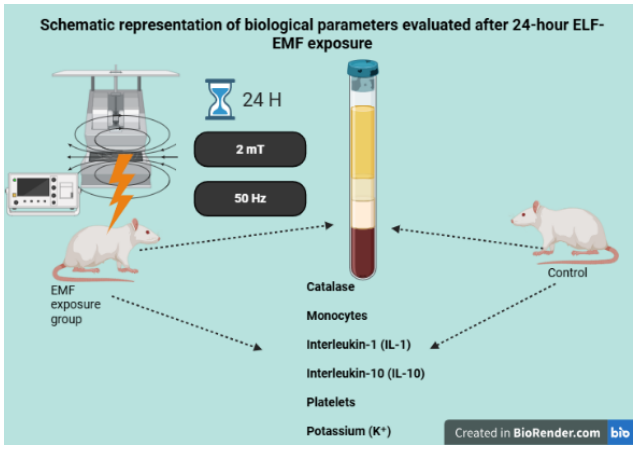
V našej pilotnej štúdii sme skúmali niekoľko biomarkerov imunitného systému v malých skupinách potkanov. Konkrétne, hlavným cieľom tejto štúdie bolo určiť vzťah medzi hladinami katalázy, monocytov a interleukínov, ako aj hladinami krvných doštičiek a draslíka v reakcii na nízkofrekvenčné elektromagnetické polia (LFEMF). Keďže trvanie expozície je premenná, ktorá významne ovplyvňuje klinický obraz, rozhodli sme sa skúmať zmeny vyvolané LFEMF počas 24-hodinového obdobia nepretržitej expozície. Pre ďalšie charakteristiky sme pre LFEMF použili elektromagnetickú vlnovú frekvenciu 50 Hz.

2 Materiály a metódy

2.1 Návrh experimentu

Do štúdie boli vybraní dospelí samci albínov divokého typu (dĺžka – 12 cm, vek 6 mesiacov) a rozdelení do experimentálnej (n=8) a kontrolnej (n=8) skupiny.

Potkany v experimentálnej skupine boli vystavené nepretržitému EMF počas 24 hodín. Ihneď po vystavení EMF bola z chvostovej žily potkanov v experimentálnej aj kontrolnej skupine odobratá krv na analýzu (obrázok 1).



Obr. 1: 24-hodinový účinok 2 mT, frekvencia: 50 Hz EMF na oxidačný systém (kataláza, IL-1, IL-10) v modeli potkanov - návrh experimentu.
Zdroj: vytvorené autormi

2.2 Generovanie EMF

Generovanie EMF sa vykonávalo pomocou Helmholtzovej cievky dostupnej v našom laboratóriu. Klietku so zvieraťom sme umiestnili do cievky. Zviera sa mohlo voľne pohybovať v klietke a potrava a voda mu boli poskytované voľne a dobrovoľne.

Počas generovania EMF sa zohľadnili nasledujúce parametre:

Expozícia trvala nepretržite 24 hodín, konkrétne potkany v experimentálnej skupine boli umiestnené do cievky na 24 hodín (od 10:00 do 10:00 nasledujúceho dňa). V experimentálnej laboratórnej miestnosti sa nepoužívalo žiadne dodatočné osvetlenie (iba prirodzené svetlo).

Intenzita EMF bola monitorovaná pomocou kalibrovaného magnetometra v rôznych bodoch expozičnej komory, kde parametre generovaného EMF boli nasledovné: amplitúda magnetického poľa: 2 mT, frekvencia: 50 Hz.

S prihliadnutím na tieto parametre bolo EMF rovnomerne rozložené v tele potkana a najmä hĺbka biologickej penetrácie bola vypočítaná pomocou štandardného vzorca [22]:

$$= \sqrt{\frac{2}{}} \quad (1)$$

kde ω=2πf; f=50 Hz; μ≈μ_0=4π×10^(-7)H/m ; δ≫ 0,12 S/m

2.3 Analýza krvi

Krv sa odoberala z chvostovej žily kontrolných potkanov. Krv sa odoberala z chvostovej žily experimentálnych potkanov bezprostredne po ukončení expozície, v hodinových intervaloch.

Na posúdenie imunitných odpovedí a bunkového stresu boli v odobratej krvi a plazme stanovené nasledujúce parametre:

Koncentrácia draslíka (v plazme) [23]: Je to dôležitý ukazovateľ homeostázy elektrolytov, ktorého koncentrácia sa mení aj v dôsledku stresu, aktivity krvných doštičiek alebo imunitných reakcií.

Koncentrácia monocytov a krvných doštičiek: Jedným z dôležitých faktorov určujúcich imunitný a hematologický stav je koncentrácia monocytov a krvných doštičiek v periférnej krvi [24], pretože sa aktívne podieľajú na bunkových stresových reakciách.

Koncentrácia katalázy v krvnej plazme: Kataláza zabraňuje tvorbe voľných radikálov, a preto je možné posúdením jej koncentrácie posúdiť aktivitu antioxidačného systému tela [25], t. j. kataláza je indikátorom aktivity antioxidačného systému.

Konkrétne rozkladá peroxid vodíka (H2O2) na vodu a voľný kyslík (O2), čím znižuje riziko tvorby voľných radikálov. Je indikátorom oxidačného stresu.

Interleukín 1 a 10 (v plazme) [26], [27]: Zmeny v koncentrácii a pomere odrážajú imunitné a zápalové reakcie spôsobené fyzickým stresom.

2.4 Štatistická analýza

Údaje sme štatisticky spracovali pomocou programu GraphPrism (štandardný štatistický program). Stanovili sme priemer ± štandardnú odchýlku (SD). Údaje kontrolnej skupiny a skupiny vystavenej elektromagnetickému poľu sme porovnali pomocou t-test nezávislých vzoriek,ajednofaktorová ANOVA. Hodnota p < 0,05 bola považovaná za štatisticky významnú.

Štúdia bola vykonaná v súlade s medzinárodnými štandardmi SLP. Protokol všetkých experimentov na potkanoch bol schválený Výborom pre starostlivosť o laboratórne zvieratá a ich používanie. Boli dodržané zásady etického zaobchádzania so zvieratami. v súlade s gruzínskymi právnymi predpismi a medzinárodnými zmluvami.

3 výsledky

Štatisticky významný zmeny v niekoľko Parametre boli pozorované v krvi odobratej z chvostovej žily potkanov po 24-hodinovej expozícii elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 50 Hz a silou 2 mT.

3.1 Zmeny v počte krvných doštičiek

Analýza periférnej krvi odobratej z chvostovej žily kontrolných potkanov odhalila stabilný počet krvných doštičiek (nízka štandardná odchýlka) s priemernou hodnotou 617,8 ± 15,2 × 10^9/L. Po 24 hodinách nepretržitého vystavenia elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT vykazovali potkany v experimentálnej skupine vysokú variabilitu počtu krvných doštičiek: 323,5 ± 114,5 ×10^9/L. Rozdiel medzi týmito dvoma skupinami bol štatisticky významný (p = 0,013), čo naznačuje významný pokles počtu krvných doštičiek po 24 hodinách nepretržitého vystavenia EMF s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT (Tabuľka 1).

Tabuľka 1. Zmeny v počte krvných doštičiek vyvolané 24 hodinami nepretržitého vystavenia elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT

Parameter - Krvné doštičky	Hodnota
Jednotka	×10^9 /L
Kontrolná skupina (priemer ± štandardná odchýlka)	617,8 ± 15,2
EMF (priemer ± SD)	323,5 ± 114,5
P-hodnota (t-test)	<0,01
ANOVA F-hodnota (df)	25,94 (1,6)
p-hodnota ANOVA	<0,001

Zdroj: vytvorené autormi

3.2 Zmeny v percentuálnom zastúpení bazofilov

Analýza krvi odobratej z chvostovej žily potkanov v študijných skupinách ukázala (Tabuľka 2), že 24-hodinová kontinuálna expozícia elektromagnetickému poľu s ultranízkou frekvenciou (ULF) s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT zmenila percento bazofilov. Konkrétne, zatiaľ čo percento bazofilov v kontrolnej skupine bolo 0,50 ± 0,09 %, po 24-hodinovej kontinuálnej expozícii elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT sa percento zvýšilo na 1,03 ± 0,10 % (p < 0,001).

Tabuľka 2. Kvantitatívne zmeny v percentuálnom zastúpení bazofily v krvi odobratej z chvostovej žily potkanov v kontrolnej a experimentálnej skupine (24-hodinový vystavenie elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT intenzita) sú zobrazené

Parameter Bazofil	Hodnota
Jednotka	%
Kontrolná skupina (priemer ± štandardná odchýlka)	0,50 ± 0,09
EMF (priemer ± SD)	1,03 ± 0,10
P-hodnota (t-test)	<0,001
ANOVA F-hodnota (df)	71,20 (1,7)
t	8,48

Zdroj: vytvorené autormi

3.3 Zmeny koncentrácie draslíka

Výsledky štúdie ukazujú (Tabuľka 3), že po 24 hodinách nepretržitého pôsobenia elektromagnetického poľa s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT sa hladina draslíka štatisticky významne zmenila. Konkrétne, koncentrácia vápnika v krvi odobratej z chvostovej žily potkanov v kontrolnej skupine bola 5,49 ± 0,46 mmol/l. Avšak po 24 hodinách pôsobenia nešpičkového EMF (frekvencia 0 Hz a intenzita 2 mT) v experimentálnej skupine potkanov sa tento ukazovateľ zdvojnásobil na 13,07 ± 3,05 mmol/l (p < 0,01), t. j. po 24 hodinách nepretržitého pôsobenia elektromagnetického poľa s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT sa pozoruje výrazná hyperkaliémia.

Tabuľka 3. Kvantitatívne zmeny koncentrácie draslíka v krvi odobratej z chvostovej žily potkanov spôsobených 24-hodinovým vystavením EMF s frekvenciafrekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mW

Parameter Draslík	Hodnota
Jednotka	mmol/l
Kontrolná skupina (priemer ± štandardná odchýlka)	5,49 ± 0,46
EMF (priemer ± SD)	13,07 ± 3,05
t-hodnota	4,92
df	6
P-hodnota	<0,01

Zdroj: vytvorené autormi

3.4 Monocyty, kataláza, interleukíny (1, 10)

V našej štúdii nemalo 24-hodinové vystavenie potkanov elektromagnetickým poliam s frekvenciou 50 Hz a silou 2 mT štatisticky významný vplyv na percento monocytov v periférnej krvi ani na koncentrácie katalázy, IL-1 a IL-10. Vzhľadom na to, že počet potkanov v experimentálnej a kontrolnej skupine bol 8, mohli sme vo väčšej experimentálnej skupine dosiahnuť odlišné rýchlosti a zmeny niektorých parametrov (Tabuľka 4).

V parametri zmien percenta monocytov vo vzorke krvi odobratej z chvostovej žily po 24 hodinách nepretržitého vystavenia elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 50 Hz a silou 2 mT bola zaznamenaná vysoká štandardná odchýlka, preto tento údaj nemožno považovať za štatisticky spoľahlivý.

Podobná zmena (štatisticky nespoľahlivá, v dôsledku vysokej SD) bola získaná aj v prípade koncentrácie katalázy, t. j. napriek tomu, že koncentrácia katalázy sa zvýšila počas 24 hodín nepretržitej expozície elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT, vysoká variabilita v ukazovateli SD nám neumožňuje považovať zmenu za štatisticky významnú (p=0,23).

Hladiny interleukínov (IL-1 a L-10) sa tiež vyznačujú vysokou variabilitou (vysoká štandardná odchýlka), v dôsledku čoho sa v skupine s EMF po 24 hodinách vystavenia EMF s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT nepotvrdili žiadne zmeny v týchto indexoch.

Tabuľka 4. Kvantitatívne indexy (percentuálny podiel) monocytov a zmeny koncentrácie katalázy po 24 hodinách vystavenia EMF s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT

Parameter	Jednotka	Ovládanie (Priemer ± SD)	Elektromagnetické pole (Priemer ± štandardná odchýlka)	P-hodnota
Monocyty	%	1,50 ± 0,29	2,88 ± 2,48	0,26
Kataláza	IU/ml	460,7 ± 6,34	600,2 ± 222,9	0,23
Interleukín 1 (IL-1)	pg/ml	3,25 ± 3,80 ± 0,87	2,57	0,72
Interleukín 10 (IL-10)	pg/ml	4,05 ± 0,96	6,43 ± 4.24	0,29

Zdroj: vytvorené autormi

4 Diskusia

V našej štúdii sme skúmali imunitnú odpoveď potkanov na 24-hodinové nepretržité vystavenie elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT.

Výsledky štúdie ukazujú, že extrémne nízkofrekvenčné EMF (50 Hz) selektívne ovplyvňujú telo a jeho biologické a biochemické procesy, o čom svedčia zmeny vo viacerých krvných parametroch pozorovaných v našej štúdii.

Výsledky štúdie naznačujú, že počas 24-hodinového nepretržitého vystavenia elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT sa niektoré parametre menia konzistentne, zatiaľ čo iné vykazujú vysokú variabilitu (vysokú štandardnú odchýlku). Napríklad v kontrolnej skupine potkanov je počet krvných doštičiek relatívne stabilný a vyznačuje sa menšou variabilitou a nízkou štandardnou odchýlkou.

odchýlka, zatiaľ čo u experimentálnych potkanov v skupine vystavenej EMF je variabilita počtu krvných doštičiek pomerne vysoká, čo môže naznačovať individuálnu citlivosť na elektromagnetické polia. Napriek tomu sa po 24-hodinovom nepretržitom vystavení elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT pozoroval štatisticky významný pokles koncentrácie krvných doštičiek.

Trombocytopénia môže byť v tomto prípade spôsobená priamymi aj nepriamymi účinkami EMF., Elektromagnetické pole môže skrátiť životnosť krvných doštičiek a súčasne potlačiť tvorbu nových krvných doštičiek [28], [29]. To sa dá vysvetliť skutočnosťou, že krvné doštičky sa tvoria z hematopoetických kmeňových buniek (HSC) za 4 – 7 dní [30] a ich životnosť v krvi je v priemere približne 7 – 10 dní [31]. V našej štúdii trvala expozícia EMF iba 24 hodín, takže produkcia krvných doštičiek pravdepodobne nebola významne ovplyvnená. Teoreticky, ak by bola produkcia krvných doštičiek úplne potlačená 24 hodinami expozície EMF, zníženie počtu krvných doštičiek v krvi by bolo maximálne 15 – 25 %. Podľa našich údajov sa počet krvných doštičiek v skupine vystavenej EMF znížil približne o 48 % (tento parameter sme vypočítali takto: zmena trombocytopénie = (Kontrola − EMF) / Kontrola × 100), čo vylučuje existenciu iba jedného mechanizmu spôsobeného expozíciou EMF – zníženie alebo zastavenie funkčnej aktivity megakaryocytov. V dôsledku toho sa spolu s oneskorením tvorby krvných doštičiek môže vyskytnúť aj zrýchlená deštrukcia krvných doštičiek alebo iné mechanizmy, ktoré by sa mohli považovať za príčinu trombocytopénie [32].

Spolu s trombocytopéniou je jedným z najvýraznejších zistení štúdie prudký nárast koncentrácie draslíka v periférnej plazme potkanov v skupine EMF, t. j. výrazná hyperkaliémia. Významné ($p < 0,01$) zvýšenie hladín draslíka v skupine EMF v porovnaní s kontrolnou skupinou naznačuje elektrolytovú nerovnováhu [33]. Môže to byť spôsobené zmenami v permeabilite bunkovej membrány vyvolanými EMF, čo vedie k významnému presunu draslíka z intracelulárneho priestoru do plazmy [34], [35].

Zvýšenie plazmatickej koncentrácie draslíka u potkanov v skupine EMF (5,49 ± 0,46 → 13,07 ± 3,05 mmol/l) možno tiež vysvetliť lýzou krvných doštičiek. Je známe, že koncentrácia draslíka v krvných doštičkách je výrazne vyššia ako v plazme (intracelulárna koncentrácia K^+ ~100–150 mmol/l oproti plazmatickej koncentrácii K^+ ~4–5 mmol/l) [36], preto sa počas lýzy krvných doštičiek do plazmy prenáša veľké množstvo draslíka.

Po vystavení EMP sa pozoroval štatisticky významný nárast percenta bazofilov. Percento bazofilov sa pri vystavení EMP takmer zdvojnásobilo, čo naznačuje stresovú alebo prozápalovú reakciu [37] a môže naznačovať aktiváciu imunitného systému spôsobenú vystavením elektromagnetickému poľu [38]. V našom prípade získané údaje podporujú hypotézu, že EMP môžu ovplyvniť reguláciu imunitnej homeostázy, najmä prostredníctvom zložiek vrodenej imunity [39].

Neboli zistené žiadne štatisticky významné zmeny v percentuálnom zastúpení monocytov, aktivite katalázy ani v koncentráciách interleukínov (IL-1 a IL-10). Hoci sa v skupine vystavenej EMP pozoroval určitý vzostupný trend, vysoká variabilita výrazne obmedzuje interpretáciu výsledkov.

Selektívne zvýšenie aktivity katalázy môže naznačovať zapojenie jednotlivých mechanizmov oxidačnej stresovej reakcie, hoci získané údaje nám neumožňujú považovať túto zmenu za spoľahlivú. Podobne vysoká štandardná odchýlka cytokínov naznačuje rozdiely v individuálnych reakciách a na zvýšenie štatistickej sily môže byť potrebná dlhšia doba expozície alebo väčší počet zvierat.

Je dôležité poznamenať, že ide o pilotnú štúdiu a jedným z obmedzení pri interpretácii výsledkov je relatívne malý počet zvierat v každej skupine ($n = 8$), čo znižuje citlivosť štatistickej analýzy na niektoré parametre. V budúcich štúdiách plánujeme preskúmať väčšie kohorty a identifikovať ďalšie molekulárne biomarkery, aby sme presnejšie posúdili mechanizmy účinku EMF.

5 Záver

Naše výsledky ukazujú, že 24-hodinová expozícia elektromagnetickému poľu s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT má významný vplyv na krv potkanov. Najmä v skupine vystavenej EMP bol pozorovaný prudký (~48 %) pokles počtu krvných doštičiek, čo prekračuje teoreticky očakávanú úroveň. Pokles počtu krvných doštičiek môže byť spôsobený nielen oneskorením ich tvorby, ale aj zrýchlenou lýzou alebo inými bunkovými mechanizmami. 24-hodinová nepretržitá expozícia EMP s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT spôsobila významný nárast koncentrácie draslíka v plazme (z 5,49 ± 0,46 na 13,07 ± 3,05 mmol/l). Tieto zmeny možno vysvetliť výsledkami analýzy krvných doštičiek [40], [41]. Štúdia konkrétne ukazuje, že počas expozície EMP dochádza k trombocytopénii a že lýza krvných doštičiek uvoľňuje veľké množstvo draslíka.

Vystavenie EMF s frekvenciou 50 Hz a intenzitou 2 mT významne zvýšilo percento bazofilov v periférnej krvi potkanov, čo naznačuje, že táto reakcia je výsledkom adaptívnej imunitnej odpovede.

Keďže 24-hodinová kontinuálna expozícia elektromagnetickým poliam s frekvenciou 50 Hz a silou 2 mT štatisticky významne nezmenila koncentrácie monocytov, katalázy a interleukínov (IL-1, IL-10) v dôsledku vysokej štandardnej odchýlky, predpokladáme, že štúdia vykonaná na väčšej populácii zvierat môže priniesť odlišné výsledky. Tieto zistenia o zmenách hematopoetických a elektrolytových parametrov potvrdzujú, že 24-hodinová kontinuálna expozícia elektromagnetickým poliam s frekvenciou 50 Hz a silou 2 mT, ako aj extrémne nízkym dávkam neionizujúceho žiarenia, predstavuje riziko v medicínskom a environmentálnom kontexte.

Vyhlásenie o generatívnej umelej inteligencii a technológiách s podporou umelej inteligencie v procese písania

Počas prípravy tejto práce autor(i) využil(i) technológie umelej inteligencie (AI) výlučne na účely jazykového zdokonalenia a gramatickej korekcie. Po použití týchto nástrojov autor(i) dôkladne skontroloval(i), overil(i) a upravil(i) výsledný text. Autor(i) si ponecháva(jú) plnú zodpovednosť za presnosť, integritu a konečný obsah publikácie.

Referencie:

[1] Prekodravac F, Milenkovič M, Kepic D, Dorontic S, Yasir M, Nardin B, Jovanović S. Elektromagnetické rušenie v modernej dobe: obavy, trendy a riešenia založené na nanomateriáloch.*Nanomateriály (Bazilej)*. 2025;15(20):1558. doi: 10.3390/nano15201558. PMID: 41149527; PMCID: PMC12566414.

[2] Quinlan KP, Lowell G, Robinson M, Musso J, Gottlieb LJ. Vytvorenie detských bezpečnostných dvierok mikrovlnných rúr na ochranu malých detí pred ťažkými obarenia. *Pediatria*. 2021;147(2):e2020021519. 10.1542/ doi: peds.2020-021519. PMID: 33472988.

[3] Dondoladze K, Nikolaishvili M, Museliani T, Jikia G, Zurabashvili D. Vplyv neionizujúceho žiarenia z domácich mikrovlnných rúr na hladiny kortizolu v krvnej plazme u potkanov a ich správanie. *Gruzínske stredomorské správy*2020;306:132–137. PMID: 33130660.

[4] Zheng R, Zhang X, Gao Y, Gao D, Gong W, Zhang C, Dong G, Li Z. Biologické účinky vystavenia elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 2650 MHz na správanie, učenie a pamäť myší.*Správanie mozgu*. 2023;13(6):e3004. doi: 10.1002/brb3.3004. PMID: 37118929; PMCID: PMC10275548.

[5] Jangid P, Rai U, Ahmed S, Singh S, Singh R. Netermálne biologické účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia: mechanistické poznatky o mužskej reprodukčnej zraniteľnosti v ére všadeprítomnej expozície. *Reprod Toxicol*. 2025;138:109087. doi: 10.1016/ j.reprotox.2025.109087. PMID: 41161550.

[6] Kenny RPW, Johnson EE, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C, Rankin J, Pearce MS, Toledano M, Craig D, Pearson F. Účinky vystavenia rádiofrekvencii na mužskú fertilitu: systematický prehľad observačných štúdií u ľudí s metaanalýzou dávka-odpoveď. *Environ Int*. 2024;190:108817. doi: 10.1016/ j.envint.2024.108817. PMID: 38880061.

[7] Gökçek-SaraçÇ, Akçay G, Karakurt S, Ateş K, Özen Ş, Derin N. Možné účinky rôznych dávok elektromagnetického žiarenia 2,1 GHz na učenie a hipokampálne hladiny cholinergných biomarkerov u potkanov Wistar.*Electromagn Biol Med*. 2021;40(1):179–190. doi: 10.1080/15368378.2020.1851251. PMID: 33259237.

[8] Stein Y, Udasin IG. Elektromagnetická precitlivenosť (EHS, mikrovlnný syndróm) - Prehľad mechanizmov.*Environment Res*. 2020;186:109445. doi: 10.1016/j.envres.2020.109445. PMID: 32289567.

[9] Hadzibegovic S, Nicole O, Andelkovic V, de Gannes FP, Hurtier A, Lagroye I, Bontempi B. Skúmanie účinkov extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí na kognitívne funkcie a funkčné mozgové markery u starnúcich myší. *Vedecký zástupca*. 2025;15(1):8365. doi: 10.1038/s41598-025-93230-y. PMID: 40069380; PMCID: PMC11897315.

[10] Nikolaišvili M, Tarkhnišvili A, Fevadze K, Natadze D, Dondoladze K. Paradox nízkodávkovanej radonizovanej minerálnej vody: neočakávané účinky na hladiny draslíka.*Séria o biomechanike*. 2025;39(3):78–82. DOI: 10.7546/SB.09.03.2025

[11] Rühm W, Wojcik A, Friedl AA. Štúdie žiarenia v južnom Urale – vietor zmien. *Biofyzika prostredia Radiat*. 2025;64(4):531–536. doi:10.1007/s00411-025-01169-5.

[12] Saliev T, Begimbetova D, Masoud AR, Matkarimov B. Biologické účinky neionizujúcich elektromagnetických polí: Dve strany mince.*Prog Biophys Mol Biol*. 2019;141:25–36. doi: 10.1016/ j.pbiomolbio.2018.07.009. PMID: 30030071.

[13] Calabrese EJ, Osakabe N, Di Paola R, Siracusa R, Fusco R, D'Amico R, Impellizzeri D, Cuzzocrea S, Fritsch T, Abdelhameed AS, Wenzel U, Franceschi C, Calabrese V. Hormesis definuje hranice životnosti. *Starnutie Res Rev*. 2023;91:102074. doi: 10.1016/j.arr.2023.102074. PMID: 37709054.

[14] Calabrese EJ, Blain RB. Hormézna databáza: výskyt horméznych reakcií na dávku v toxikologickej literatúre.*Regul Toxicol Pharmacol*2011;61(1):73–81. doi: 10.1016/j.yrtph.2011.06.003. PMID: 21699952.

[15] Mattson MP, Leak RK. Hormézny princíp neuroplasticity a neuroprotekcie.*Metabolizmus buniek*. 2024;36(2):315–337. doi: 10.1016/j.cmet.2023.12.022. PMID: 38211591.

[16] Saal FS. Kontroverzia hormézy.*Environmentálna veda a technológia*. 2007;41(1):3. doi: 10.1021/es072436l. PMID: 17265914.

[17] Sies H, Mailloux RJ, Jakob U. Základy redoxnej regulácie v biológii.*Nat Rev Mol Cell Biol*. 2024;25(9):701–719. doi: 10.1038/s41580-024-00730-2. PMID: 38689066; PMCID: PMC11921270.

[18] Lim VJT, Tabassum NI, Orian JM, Arumugam TV, Weng EF. Horméza a ochorenia mozgu. *Výskum prognóz mozgu*2025;295:229–258. doi: 10.1016/bs.pbr.2025.05.003. PMID: 40769640.

[19] Nitti M, Marengo B, Furfaro AL, Pronzato MA, Marinari UM, Domenicotti C, Traverso N. Horméza a oxidačná tieseň: Patofyziológia reaktívnych foriem kyslíka a otvorená otázka modulácie a suplementácie antioxidantmi.*Antioxidanty (Bazilej)*. 2022;11(8):1613. doi: 10.3390/antiox11081613. PMID: 36009331; PMCID: PMC9405171.

[20] Franceschelli S, De Cecco F, Benedetti S, Panella V, Speranza L, Grilli A, D'Andrea P. Protizápalová aktivita magnetických polí emitovaných grafénovými zariadeniami na kultivovaných ľudských bunkách.*J Biol Eng*. 2025; 19 (1): 36. doi: 10.1186/s13036-025-00507-x. PMID: 40259390; PMCID: PMC12013070.

[21] Mišík M, Kundi M, Worel N, Ferk F, Hutter HP, Grusch M, Nersesyan A, Herrera Morales D, Knasmueller S. Vplyv elektromagnetických polí špecifických pre mobilné telefóny na poškodenie DNA spôsobené expozíciami relevantnými pre zamestnanie: výsledky ex vivo experimentov s mononukleárnymi bunkami periférnej krvi z rôznych demografických skupín.*Mutagenéza* 2023;38(4):227–237. doi: 10.1093/mutage/gead022. PMID: 37418160; PMCID: PMC10448860.

[22] Bodewein L, Schmiedchen K, Dechent D, Stunder D, Graefrath D, Winter L, Kraus T, Driessen S. Systematický prehľad biologických účinkov elektrických, magnetických a elektromagnetických polí v strednofrekvenčnom rozsahu (300Hz až1 MHz).*Environment Int*2019;124:247–259. doi: 10.1016/j.envres.2019.01.015. PMID: 30690271.

[23] Meyer F, Bitsch A, Forman HJ, Fragoulis A, Ghezzi P, Henschenmacher B, Kellner R, Kuhne J, Ludwig T, Sachno D, Schmid G, Tsaioun K, Verbeek J, Wright R. Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu na biomarkery oxidačného stresu in vivo a in vitro: Systematický prehľad experimentálnych štúdií.*Environ Int*. 2024;194:108940. doi: 10.1016/j.envint.2024.108940. PMID: 39566441.

[24] Zhao C, Lv Q, Yang J, Li M, Zhao Q, Ma H, Jia X. Návrh a simulácia magnetizačnej budiacej cievky založenej na Helmholtzovom princípe a experimentálna štúdia. *Mikrostroje (Bazilej)*. 2023;14(1):152. doi: 10.3390/mi14010152. PMID: 36677213; PMCID: PMC9866441.

[25] Jackson JD.*Klasická elektrodynamika*.3. vydanie. New York: Wiley; 1999. s. 299–301. ISBN 978-0-471-30932-1.

[26] Hoehne SN, Hopper K, Epstein SE. Retrospektívne hodnotenie závažnosti a prognózy spojenej s abnormalitami draslíka u psov a mačiek, ktorí sa dostavili na pohotovosť (január 2014 – august 2015): 2441 prípadov.*J Vet Emerg Crit Care (San Antonio)*. 2019;29(6):653–661. doi: 10.1111/vec.12889. PMID: 31482659.

[27] Zhang X, Zhang B, Li D, Yang Y, Lin S, Zhao R, Li Y, Peng L. Počet periférnych krviniek ako prediktor nežiaducich udalostí súvisiacich s imunitou u pacientov s rakovinou, ktorí dostávajú inhibítory imunitných kontrolných bodov: systematický prehľad a metaanalýza.*Predný imunolog*. 2025;16:1528084. doi: 10.3389/fimmu.2025.1528084. PMID: 39949762; PMCID: PMC11821924.

[28] Koupenova M, Clancy L, Corkrey HA, Freedman JE. Cirkulujúce krvné doštičky ako mediátory imunity, zápalu a trombózy. *Circ Res*2018;122(2):337–351. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.117.310795. PMID: 29348254; PMCID: PMC5777300.

[29] Montejo U, Beldarrain G, Olza S, Alart JA, Chillida M, García-Alonso I, Alonso-Alconada

D, Alonso-Varona A, Herrero de la Parte B. Mikrotitračná analýza na kvantifikáciu aktivity katalázy v biologických vzorkách. *Metódy*. 2026;246:186–194. doi: 10.1016/j.ymeth.2025.12.009. PMID: 41422878.

[30] Jomova K, Alomar SY, Alwasel SH, Nepovimova E, Kuca K, Valko M. Niekoľko línií antioxidačnej obrany proti oxidačnému stresu: antioxidačné enzýmy, nanomateriály s viacerými aktivitami napodobňujúcimi enzýmy a antioxidanty s nízkou molekulovou hmotnosťou. *Oblúk Toxicol*2024;98(5):1323–1367. doi: 10.1007/s00204-024-03696-4. PMID: 38483584; PMCID: PMC11303474.

[31] Kozlov AV, Javadov S, Sommer N. Bunkové ROS a antioxidanty: fyziologická a patologická úloha.*Antioxidanty (Bazilej)*. 2024;13(5):602. doi: 10.3390/antiox13050602. PMID: 38790707; PMCID: PMC11117742.

[32] Gallenga CE, Pandolfi F, Caraffa A, Kritas SK, Ronconi G, Toniato E, Martinotti S, Conti P. Cytokíny a žírne bunky rodiny interleukínu-1: aktivácia a inhibícia.*J Biol Regul Homeost Agents*2019;33(1):1–6. PMID: 30656901.

[33] Meunier D, Corona-Torres R, Boulton K, Wu Z, Ballantyne M, Glendinning L, Ahmad AA, Borowska D, Taylor L, Vervelde L, Del Pozo J, Vasilogianni M, Jaramillo-Ortiz J, Sanchez-Arsuaga G, Psifidi A, Tomley F, Watson KA, McGrew MJ, Stevens MP, Blake DP, Hume DA. Interleukín 10 riadi rovnováhu medzi toleranciou, elimináciou patogénov a imunopatológiou u vtákov.*Elife*. 2025;14:RP106252. doi: 10.7554/eLife.106252. PMID: 41100345; PMCID: PMC12530801.

[34] Berrueco R, Dapena JL, Sebastián E, Sastre A. Controversias en el tratamiento de la trombocitopenia imunizovať pediatria Kontroverzie v liečbe detskej imunitnej trombocytopénie.*Pediater (anglické vydanie)*. 2018;89(3):189.e1–189.e8. 10.1016/ doi: j.anpedi.2018.06.010. 30033108. PMID:

[35] Kaušanský K. Historické recenzia: megakaryopoéza a trombopoéza.*Krv*. 2008;111(3):981–6. doi: 10.1182/ blood-2007-05-088500. PMID: 18223171; PMCID: PMC2214745.

[36] Machlus KR, Italiano JE Jr. Neuveriteľná cesta: Od vývoja megakaryocytov k tvorbe krvných doštičiek.*J Cell Biol*. 2013;201(6):785–96. doi: 10.1083/jcb.201304054. PMID: 23751492; PMCID: PMC3678154.

[37] Chang Y, Auradé F, Larbret F, Zhang Y, Le Couedic JP, Momeux L, Larghero J, Bertoglio J, Louache F, Cramer E, Vainchenker W, Debili N. Tvorba prokrvných doštičiek je regulovaná dráhou Rho/ROCK.*Krv*. 2007;109(10):4229–36. doi: 10.1182/ blood-2006-04-020024. PMID: 17244674.

[38] Hnedá DH, Paloian New Jersey. Hypokaliémia/Hyperkaliémia Hyponatrémia a Hypernatrémia. 2023;44(7):349–362. doi: *Pediatr Rev.*. 10.1542/pir.2021-005119. PMID: 37391630.

[39] Pliquett U, Joshi RP, Sridhara V, Schoenbach KH. Účinky silného elektrického poľa na bunkové membrány. *Bioelektrochémia*. 2007;70(2):275–82. doi: 10.1016/j.bioelechem.2006.10.004. PMID: 17123870.

[40] Cecchetto C, Maschietto M, Boccaccio P, Vassanelli S. Elektromagnetické pole ovplyvňuje napäťovo závislý draslíkový kanál Kv1.3. *Electromagn Biol Med*2020;39(4):316–322. doi: 10.1080/15368378.2020.1799386. PMID: 32783480.

[41] Matuszkiewicz-Rowińska J, Wojtaszek E. Homeostaza potasu [Homeostáza draslíka]. *Wiad Lek*2013;66(4):286–9. PMID: 24490478.

Príspevok jednotlivých autorov k vytvoreniu vedeckého článku (zásady ghostwritingu)

Autori sa rovnakou mierou podieľali na predloženom výskume vo všetkých fázach od formulácie problému až po konečné zistenia a riešenie.

Zdroje financovania výskumu prezentované vo vedeckom článku alebo samotný vedecký článok

Na vykonanie tejto štúdie neboli získané žiadne finančné prostriedky.

Konflikt záujmov

Autori nemajú žiadne konflikty záujmov, ktoré by mohli vyhlásiť, a ktoré by sa týkali obsahu tohto článku.

Licencia Creative Commons Attribution 4.0 (Attribution 4.0 International, CC BY 4.0)

Tento článok je publikovaný podľa podmienok licencie Creative Commons Attribution License 4.0 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en_US