



Vplyv Wi-Fi na mezonefros u 9-dňového kuracieho embrya

Viera Almášiová¹ · Sandra Andrašková¹ · Viera Karaffová¹ · Patrícia Hudáková¹ · Ján Molnár² · Štefan Tóth³ · Katarína Holovská¹

Prijaté: 14. marca 2025 / Schválené: 15. mája 2025
© Autor(i) 2025

Abstrakt

Používanie bezdrôtových zariadení sa v poslednom čase rýchlo zvýšilo, najmä v rozvinutých krajinách. V dôsledku toho sú všetky živé systémy do istej miery permanentne vystavené tomuto umelému elektromagnetickému neionizujúcemu žiareniu (NIR). Tieto moderné zariadenia poskytujú používateľom nespočetné výhody, ale nevýhodou ich nadmerného používania je produkcia elektrosmogu. Tento fyzikálny znečisťovateľ prostredia môže byť obzvlášť nebezpečný najmä počas vývojového obdobia jedinca. Cieľom tejto štúdie bolo objasniť vplyv Wi-Fi žiarenia na vývoj mezonefrózy u kuracieho embrya na 9. deň inkubácie. Kontinuálna 9-dňová aplikácia žiarenia s frekvenciou 2,4 GHz a hustotou výkonu 200 – 500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$... Nemalo to žiadny nepriaznivý vplyv na celkový vývoj mezonefrózy, avšak vo vyvíjajúcich sa mezonefrických telieskach a tubuloch sa zistili mierne difúzne degeneratívne zmeny. V okolitom intersticiu boli prítomné aj prekrvené krvné cievy, ale nezistili sa žiadne známky zápalového infiltrátu. V skupine s Wi-Fi sme tiež zaznamenali signifikantne zvýšený počet apoptotických a proliferujúcich buniek, ako aj signifikantné zvýšenie expresie génu kaspázy-1. Výsledky naznačujú, že neionizujúce žiarenie pri frekvencii a hustote výkonu použitej v štúdii môže interferovať s kľúčovými regulačnými mechanizmami zapojenými do normálneho vývoja tkanív a orgánov.

Kľúčové slová Wi-Fi · Kuracie embryo · Mezonefros · Vývoj

Úvod

Wi-Fi sa stalo každodennou rutinou modernej spoločnosti, pretože umožňuje veľmi pohodlné pripojenie k internetu a rôznym dátam na rôznych miestach. Verejné priestory s ľahko dosiahnuteľným pripojením na internet, tzv. hotspoty, sú rozmiestnené takmer všade. Vzhľadom na takýto značný

Vzhľadom na rozšírenie neionizujúceho žiarenia (NIR) produkovaného modernými zariadeniami, ako sú Wi-Fi, mobilné telefóny, základňové stanice a iné bezdrôtové technológie, ktoré ľudská populácia používa denne, možno predpokladať jeho masívnu a kumulatívnu povahu. Bezdrôtové technológie zvyčajne fungujú na základe pulzácií, ktoré sú pre telo nebezpečnejšie ako nepretržité šírenie elektromagnetických vln (Van Boxem a kol. 2014 Pall 2018). Tieto umelo vytvorené vlny sú tiež polarizované, a preto sú pre živú hmotu nebezpečnejšie ako nepolarizované vlny (Panagopoulos a kol. 2015). Boli tiež odhalené expozičné okná, v ktorých dochádza k významnej biologickej reakcii pri špecifickej intenzite (Foletti a kol. 2010 Pall 2018). Celkovo, aj keď je vystavenie tela umelému NIR v bežnom prostredí mnohonásobne slabšie ako limity expozície stanovené Medzinárodnou komisiou pre ochranu pred neionizujúcim žiarením – ICNIRP (ICNIRP 2020), ako aj IEEE Std C95.1–2019 (IEEE 2019) bude potrebné túto problematiku podrobne preštudovať, najmä ak sa týka citlivých jedincov, ako sú mladé a vyvíjajúce sa organizmy

Viera Karaffová
viera.karaffova@uvlf.sk

- ¹ Katedra morfológických disciplín, Univerzita veterinárskeho lekárstva a farmácie v Košiciach, Komenského 73, Košice, Slovensko
- ² Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovensko
- ³ Ústav histológie a embryológie, Lekárska fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Šrobárova 2, Košice, Slovensko

(Redmayne a Johansson 2015 Xu a kol. 2016 Šalvia a Burgio 2017 Woelders a kol. 2017 Othman a kol. 2018).

Kuracie embryo je ideálnym modelovým organizmom na štúdium vplyvov rôznych environmentálnych znečisťujúcich látok na embryonálny vývoj vďaka svojej nenáročnej dostupnosti, pohodlnej manipulácii a jednoduchému pozorovaniu raných štádií embryogenézy. Keďže ide o vajcorodý druh, akúkoľvek reakciu na externe aplikované NIR možno pripísať jeho priamej interakcii s vyvíjajúcim sa organizmom a nie je ovplyvnená matkou (Ubeda a kol. 1994). Celý prenatálny vývoj je veľmi dynamický a zložitý proces, ktorý zahŕňa intenzívne bunkové delenie, migráciu, diferenciáciu a apoptózu, a preto akýkoľvek vonkajší impulz môže narušiť tieto citlivé procesy a viesť k rôznym nepriaznivým zdravotným následkom (Abdel-Rassoul a kol. 2007 Behari 2010).

Keďže neustále rastie tendencia používať bezdrôtové zariadenia, ako aj zavádzať nové frekvencie NIR pre väčšiu spokojnosť používateľov a na druhej strane veľký nedostatok informácií o vplyve Wi-Fi na celkový vývoj jedinca, cieľom tejto štúdie bolo zhodnotiť jej vplyv na vývoj obličiek u 9-dňového kuracieho embrya z morfológického hľadiska.

Materiály a metódy

Experimentálna schéma

Štyridsať (40) oplodnených slepačích vajec (*Gallus gallus domesticus*) plemena Lohmann Brown, zakúpeného z kuracej farmy Párovské Háje, Nitra, Slovenská republika, bolo náhodne rozdelených do dvoch kontrolných skupín (CO 1, $n=10$ a CO2, $n=10$) a

dve Wi-Fi (Wi-Fi 1, $n=10$ a Wi-Fi 2, $n=10$) skupiny. Vajcia boli inkubované pri teplote 37,5 °C a vlhkosti vzduchu 60 % v dvoch samostatných automatických inkubátoroch (River systems ET49, Campodarsego, Taliansko).

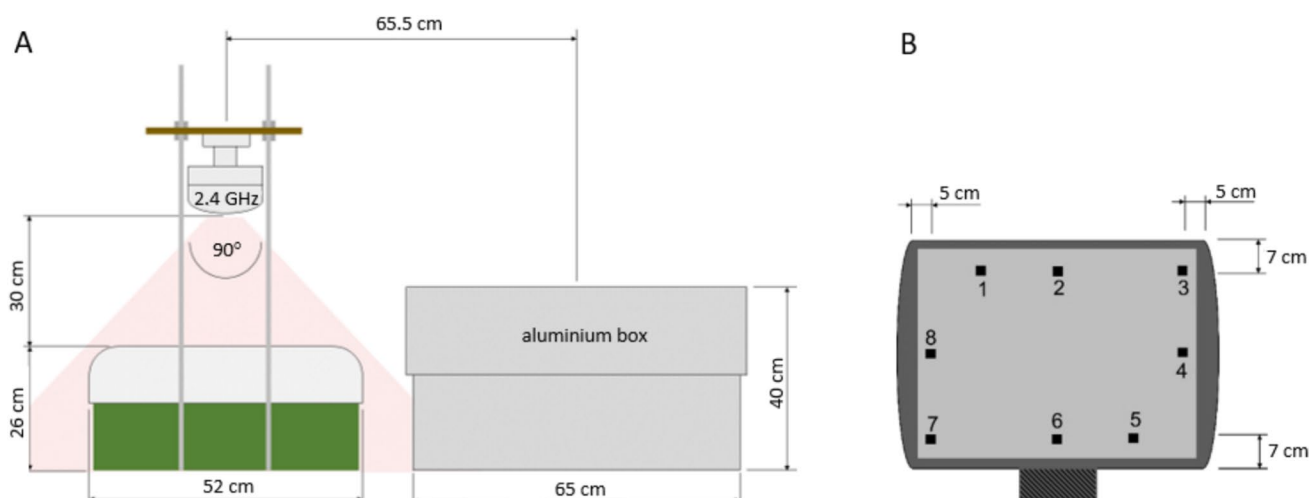
Vajcia zo skupín Wi-Fi ($n=20$) boli vystavené NIR s frekvenciou 2,4 GHz a hustotou výkonu 200 – 500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ trvalo počas 9 dní. Vzdialenosť vajčiek od zdroja žiarenia (anténa Mikrotik Metal 52 ac 15 s) bola 45 cm.

Vajíčka zo skupín CO ($n=20$) boli inkubované v inkubátore tienenom hliníkovou krabicou za rovnakých inkubačných podmienok a v rovnakej miestnosti ako skupiny s Wi-Fi (obr. 1A). Pred vykonaním experimentu sa vykonalo vyhodnotenie sily signálu Wi-Fi pri výkone antény 10 dBm pomocou digitálneho vysokofrekvenčného analyzátora pre frekvencie 2,4 – 6 GHz (HF W 35C, Gigahertz solutions GmbH, 90579 Langenzenn, Nemecko). Na základe usporiadania vykurovacieho telesa a ventilátora inkubátora bolo vybraných osem meracích bodov nad vajčkami pre oba inkubátory (obr. 1B). Výsledky meraní zo skupiny Wi-Fi boli ďalej použité na pridelenie 20 vajec do každého inkubátora spôsobom, ktorý zabezpečuje porovnateľné vystavenie Wi-Fi (hustota výkonu v rozmedzí od 200 do 500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$). Hustota výkonu v tienennom inkubátore sa pohybovala od 1 do 7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (Tabuľka 1).

Podľa smernice 2010/63/EÚ si použitie kuracích embryí ako zvieracieho experimentálneho modelu nevyžaduje schválenie etickou komisiou.

Konvenčná svetelná mikroskopia

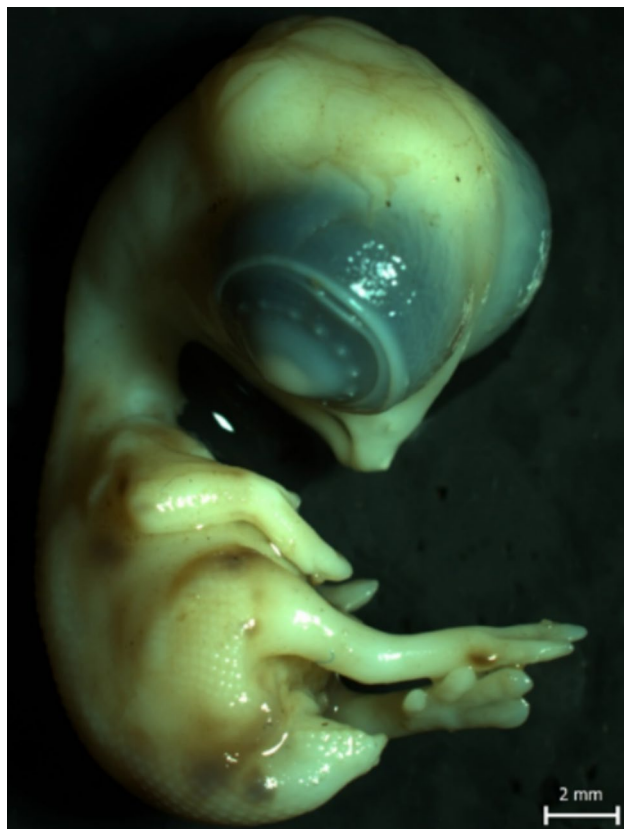
Na 9. deň vývoja embryí boli embryá zo skupín CO1 a Wi-Fi1 opatrne vybraté z vajčiek, zbavené všetkých obalov, utraťené a fixované v modifikovanej Davidsonovej kalichke.



Obr. 1 Experimentálna schéma. **A**–Ľavý inkubátor s vajčkami vystavenými Wi-Fi a pravý inkubátor zakrytý tieniacou skrinkou chrániacou vajčka pred blízkym infračerveným žiarením. **B**–Osem bodov merania sily signálu Wi-Fi

Tabuľka 1 Sila signálu Wi-Fi v rôznych meracích bodoch (frekvencia 2,4 GHz, výkon antény 10 dBm, rýchlosť odosielania dát 98 Mb/s)

Hustota výkonu [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]								
Meracie body	1	2	3	4	5	6	7	8
Kontrolná skupina	2	1	4	6	5	3	7	2
Skupina Wi-Fi	300	500	500	3600	300	400	200	1300

**Obr. 29** - dňové kuracie embryo (vlastný zdroj)

tekutina-mDF (Latendresse a kol. 2002) konvenčnou ponorením na 24 hodín. Následne boli celé embryonálne telieska vyšetrené pod disekčným mikroskopom (SZ 61) vybaveným digitálnou kamerou Promicra (obr. 2), dehydratované v stupňovitej sérii etanolu, prenesené do xylénu a vložené do paraplástových blokov (Sigma-Aldrich). Šesť (6) μm hrubých sériových parasagitálnych rezov cez lavú časť embryonálneho tela ($n=10$) z každého bloku bolo zafarbených hematoxylínom-eozínom (HE) a vyhodnotených svetelným mikroskopom Zeiss Axio Lab A1 a fotodokumentovaných kamerou Axio Cam ERc 5. V každej tkanivovej reze sme vyhodnotili náhodne vybrané polia z kaudálnej (10 polí), strednej (10 polí) a lebečnej (10 polí) časti mezonefrózy.

Detekcia TUNELu

Štyri (4) μm hrubé sériové parasagitálne tkanivové rezy z rovnakých paraplástových blokov (CO 1, $n=10$ a Wi-Fi 1, $n=10$),

boli použité na stanovenie apoptotických buniek v mezonefroze, ktoré sa uskutočnilo pomocou značenia koncov koncov terminálnou deoxynukleotidyltransferázou – TUNEL test (In situ Cell Death Detection Kit, Fluorescein, Roche, Nemecko). Rezy tkaniva boli deparafinizované, rehydratované v odstupňovanom etanolovom roztoku až do použitia vody. Sklíčka boli potom ošetrené 10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ proteinázy K v 10 mM Tris/HCl (pH 7,5) počas 30 minút pri izbovej teplote. Po dvoch premytiach 0,01 M fosfátovým tlmivým roztokom (PBS, pH 7,4) boli rezy značené reakčnou zmesou TUNEL v súlade so stanoveným protokolom. Reakcia značenia sa uskutočnila pri teplote 37 °C počas 60 minút vo zvlhčenej komore v tme. Po trojnásobnom premytí v PBS boli sklíčka montované pomocou fluorescenčného média (H-1200, VECTASHIELD, Vector Laboratories, Burlingame, CA, USA). Snímky boli získané pomocou fluorescenčného mikroskopu Nikon Eclipse H550L (Japonsko) pripojeného k digitálnemu fotoaparátu (ProgRes MF JENOP-TIK). Boli vyhodnotené s použitím excitačnej vlnovej dĺžky v rozsahu 450 – 500 nm a detekcie v rozsahu 515 – 565 nm (zelená). V každej tkanivovej reze (CO1, $n=10$ a Wi-Fi 1, $n=10$) Desať (10) náhodne vybraných polí (500 buniek na jedno pole) z mediálneho a kaudálneho parenchýmu mezonefrózy bolo vyhodnotených pri objektívnom zväčšení $\times 20$. Počet TUNEL pozitívnych buniek spočítali dvaja nezávislí histológovia pomocou svetelného mikroskopu Zeiss Primostar a cytometrického softvéru Quick Photo Industrial 3.2 na analýzu obrazu (Promicra). Kraniálna časť mezonefrózy bola z hodnotenia zámerne vylúčená.

Detekcia MCM2

Nasledujúce 4 μm hrubé sériové parasagitálne rezy ($n=10$) z rovnakých paraplástových blokov (CO 1 a Wi-Fi 1) boli použité na stanovenie proliferatívnej aktivity buniek s použitím proliferatívneho faktora Minichromosome Maintenance Complex Component 2 (Anti-MCM2, 1:200, Abcam, Spojené kráľovstvo). Po deparafinizácii a rehydratácii bola endogénna peroxidázová aktivita blokována 3 % H_2O_2 v metanole. Predbežná úprava sa uskutočnila v mikrovlnnej rúre pri výkone 600 W počas 15 minút v 0,01 M citrátovom pufri (pH 6,0). Na imunohistochemickú detekciu boli všetky rezy ošetrené primárnou protilátkou cez noc pri teplote 4 °C vo zvlhčenej komore. Po premytí PBS bola sekundárna protilátka aplikovaná na sklíčka na 1 hodinu pri izbovej teplote. Pozitívne bunky boli vizualizované diaminobenzidínom (DAB; Sigma-Aldrich, Merck, Nemecko) a kontrastne farbené Mayerovým hematoxylínom.

Podobne, vo všetkých tkanivových rezoch (CO 1, $n=10$ a Wi-Fi 1, $n=10$) Desať (10) náhodne vybraných polí (500 buniek na jedno pole) z mediálneho a kaudálneho parenchýmu mezonefrózy bolo vyhodnotených pri objektívnom zväčšení $\times 20$. Kraniálna časť mezonefrózy bola z hodnotenia tiež zámerne vylúčená. Počet MCM2 pozitívnych buniek spočítali dvaja nezávislí histológovia pomocou svetelného mikroskopu Zeiss Primostar a cytometrického softvéru Quick Photo Industrial 3.2 (Promicra) na analýzu obrazu.

Štatistická analýza detekcie TUNEL a MCM2

Údaje zozbierané z detekcie TUNEL a MCM2 boli analyzované a štatistická významnosť rozdielov medzi skupinou CO1 a Wi-Fi1 bola stanovená pomocou párového T-testu (GraphPad Prism 8.0, USA). Údaje boli prezentované ako priemerná štandardná odchýlka ($\pm$ SD). Zohľadnili sme $p < 0,05$ štatisticky významné a $p < 0,001$ veľmi významné.

Génová expresia

Homogenizácia tkaniva a izolácia celkovej RNA

Embryá z CO2 ($n=10$) a Wi-Fi 2 ($n=10$) skupiny boli opatrne vybraté z vajčiek, zbavené všetkých obalov a utratené. Pod preparátnym mikroskopom (SZ 61) bola otvorená telová dutina každého embrya a boli odobraté ľavostranné aj pravostranné mezonefros. Vzorky boli okamžite umiestnené do roztoku RNA Later (Qiagen, Spojené kráľovstvo) a uskladnené pri teplote -70°C pred purifikáciou celkovej RNA podľa popisu Karaffovej a kol. (2017).

Kvantitatívna PCR v reálnom čase (qRT-PCR)

Bola meraná relatívna génová expresia kaspázy-1. Okrem toho bola meraná relatívna expresia mRNA referenčných génov kódujúcich UB (ubikvitín) a GAPDH (glyceraldehyd-3-fosfát)

Tabuľka 2 Zoznam primerov použitých v qReal-Time PCR na kvantifikáciu génovej mRNA

Základný náter	Sekvencia 5'-3'	Žihanie/ teplota čas	Referencie
Casp-1 Fw	GATACGTGACTCCATCG ACCC	47 °C / 60 s	Grze- gorze- wska a podobne al. 2016
Casp-1 Rev	CTTCTTCAGCATTGTAG TCC		
UB Fw	GGGATGCAGATCTTCGT GAAA	59 °C / 30 s	De Boever a kol. 2008
UB Rev	CTTGCCAGCAAAGATCA ACCTT		
GAPDH Fw	CCTGCATCTGCCCATTT		
GAPDH Rev.	GGCACGCCATCACTATC		

dehydrogenáza) boli vybrané na základe dosiahnutej stability expresie (softvér geNorm). Sekvencie primerov a optimálne podmienky nasadenia pre každý primer použitý pre qRT-PCR sú uvedené v tabuľke 2. Všetky sady primerov umožňovali účinnosť amplifikácie DNA medzi 94 a 100 %. Amplifikácia a detekcia špecifických produktov sa uskutočnila s použitím Power SYBR™ Green PCR Master Mix (Thermo Scientific, USA) na zariadení LightCycler 480 II (Roche, Švajčiarsko). qRT-PCR použitá na detekciu relatívnej expresie mRNA pre kaspázu-1 sa uskutočnila počas 38 cyklov za nasledujúcich podmienok: počiatočná denaturácia pri 94°C počas 3 minút, následná denaturácia pri 93°C počas 45 sekúnd; žihanie (Tab. 2); finálny krok extenzie počas 2 minút pri 72°C . Pre každú jednotlivú platňu qRT-PCR bola vytvorená krivka topenia od 50°C do 95°C s odčítaniami každých 0,5 °C. Všetky reakcie pre PCR v reálnom čase boli vykonané duplicitne a priemerné hodnoty duplikátov boli použité na ďalšiu analýzu. Taktiež sme potvrdili, že účinnosť amplifikácie pre každý vybraný gén (vrátane GAPDH, UB) bola v exponenciálnej fáze reakcie v podstate 100 %, kde bol vypočítaný kvantifikačný cyklus (Cq). Hodnoty Cq študovaných génov boli normalizované na priemernú hodnotu Cq referenčných génov (ΔCq) a relatívna expresia každého génu bola matematicky vypočítaná ako $2^{-\Delta\text{Cq}}$.

Štatistická analýza génovej expresie

Štatistická analýza údajov o génovej expresii sa uskutočnila pomocou neparametrického T-testu v programe Graph Pad Prism verzie 8.00. Rozdiely medzi priemernými hodnotami pre skupiny sa považovali za štatisticky vysoko významné pri $p < 0,001$. Hodnoty sú uvedené ako priemery so štandardnými odchýlkami.

Výsledky

Konvenčná svetelná mikroskopia

V histologických rezoch kuracích embryí zo skupín CO a Wi-Fi sme pozorovali dobre formované orgány bez výrazných štrukturálnych abnormalít. Celý povrch tela bol pokrytý kožou s jasne vytvorenou epidermou a prilahlým mezenchýmom. V oblasti hlavy sa nachádzali veľmi dobre vyvinuté mozgové hemisféry, oko, nosová dutina, zobák a jazyk s charakteristickou histologickou štruktúrou. Telesná dutina obsahovala typické srdce s prilahlými veľkými cievami, pľúca s prekursorami parabronchov, pečeň s vyvíjajúcimi sa šnúrami hepatocytov a slezinu. Jasne boli definované aj priedušnica, pažerák, žľazový a svalový žalúdok, črevá a kloaka. Indiferentná pohlavná žľaza bola pevne spojená s mezonefrosom, v blízkosti ktorého prebiehal Müllerov vývod. Malé

Prítomné boli aj prekursori budúcej definitívnej obličky, matanefros (obr.3).

Napriek dobre pokročilej organogenéze, ktorá bola pozorovaná na úrovni svetelnej mikroskopie v oboch skúmaných skupinách, bolo v skupine Wi-Fi pozorovaných niekoľko jemných štrukturálnych zmien. Mezonefrózy u embryí z oboch skupín (CO 1 a Wi-Fi 1) boli pokryté tenkou kapsulou spojivového tkaniva a vyvíjajúci sa parenchým bol zložený z mezonefrických teliesok, mezonefrických tubulov a mezonefrického kanálika. Všetky vyššie uvedené štrukturálne komponenty boli obklopené riedkym intersticiom s krvnými cievami rôzneho kalibru. V kontrolnej skupine neboli prítomné žiadne známky degenerácie vo väčšine parenchýmu, s výnimkou fokálnej fyziologickej degenerácie v lebečnej časti mezonefrózy (obr.4A–C). V skupine s Wi-Fi vykazoval celý mezonefrický parenchým zjavné známky difúznej degenerácie. Zamerali sme sa na kraniálnu, strednú a kaudálnu oblasť mezonefrózy a zistili sme nasledujúce štrukturálne zmeny: niektoré mezonefrické telieska mali relatívne zachovanú štruktúru s dobre definovaným glomerulom a kapsulou (obr.4D, E), ale iné vykazovali úplný štrukturálny rozpad (obr.4F). Zvýšený výskyt duplicitných obličkových krviniek sa zistil aj v skupine s Wi-Fi (obr.4D). Mezonefrické tubuly obsahovali zvýšený počet scvrknutých, mŕtvych buniek s tmavým jadrovým chromaťinom a silne eozinofilnou cytoplazmou. Intersticiom v skupine Wi-Fi obsahovalo výrazne prekrvené cievy, ale neboli prítomné žiadne zápalové infiltráty (obr.4D – F).

Detekcia TUNEL a MCM2

TUNEL pozitívne bunky s intenzívnou, jasnozelenou farbou boli prítomné v mezonefrických tubuloch a mezonefrických krvinkách v kontrolnej aj Wi-Fi skupine. Mezonefrické tubuly a mezonefrické krvinky však v Wi-Fi skupine obsahovali výrazne vyšší počet TUNEL pozitívnych buniek v porovnaní s kontrolnou skupinou (obr.5A, C). Pomocou

semikvantitatívnom hodnotení sme zaznamenali významný nárast ($p < 0,001$) v bunkách pozitívnych na TUNEL v skupine s Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou (obr.6).

Bunky pozitívne na MCM2, ktoré vykazovali intenzívne jasne hnedé sfarbenie, sa objavili v porovnateľnom počte v tubuloch a krvinkách kontrolnej skupiny aj skupiny s Wi-Fi (obr.5B, D). Semikvantitatívne hodnotenie odhalilo významný ($p < 0,05$) zvýšenie počtu MCM2 pozitívnych buniek v skupine Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou (obr.6).

Relatívna génová expresia pre kaspázu – 1

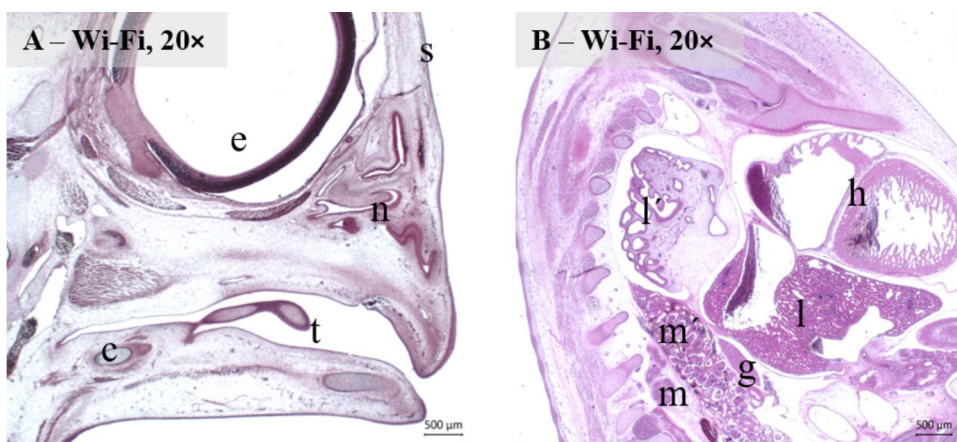
Zaznamenali sme výrazné zvýšenie regulácie ($p < 0,001$) pre kaspázu—1 v skupine s Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou (obr.7).

Diskusia

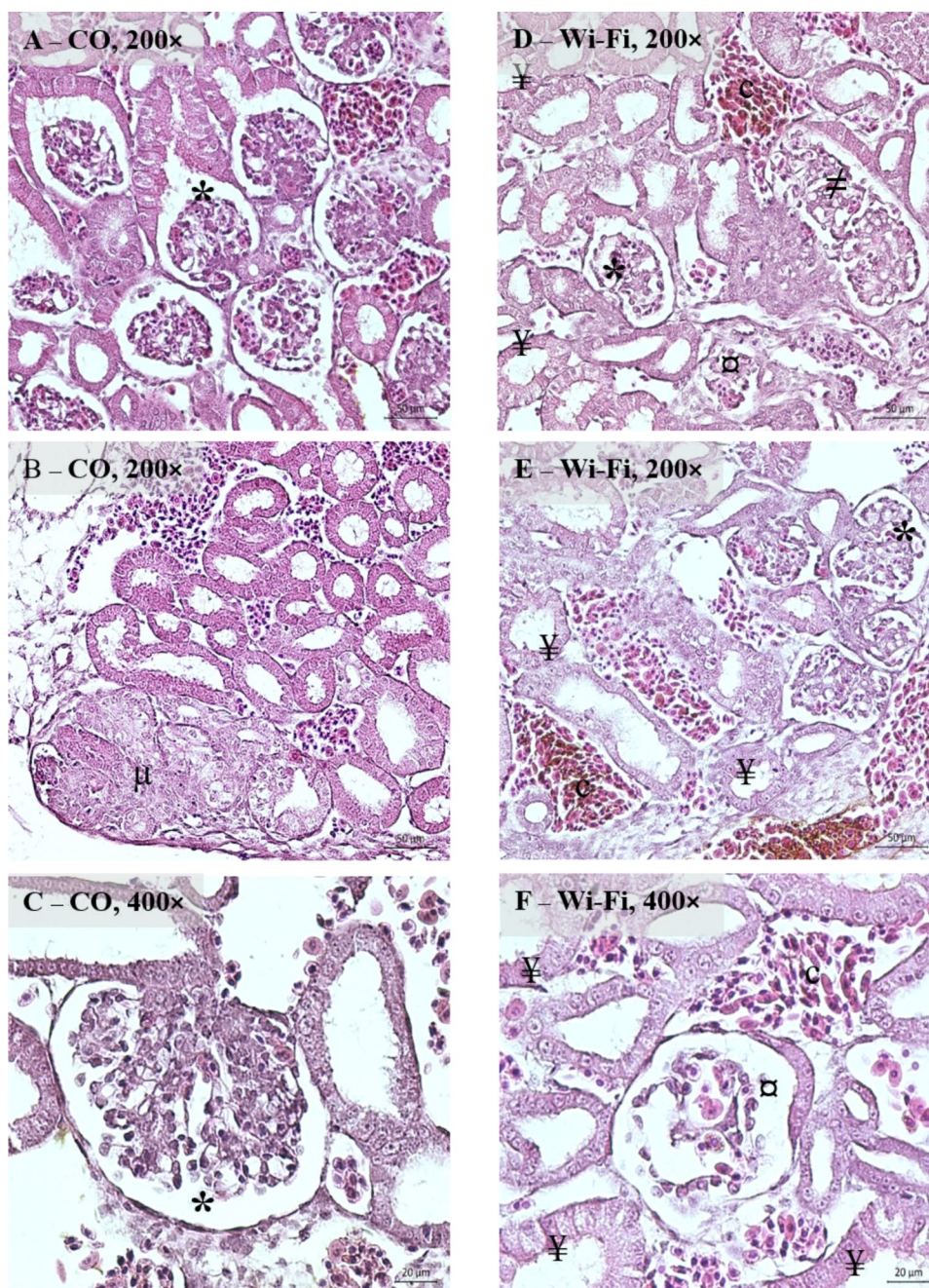
Je všeobecne známe, že NIR môže ovplyvňovať živé organizmy dvoma možnými spôsobmi. Prvým spôsobom je tzv. tepelný efekt, spôsobený vibráciami a rotáciou molekúl v tkanivách s následným zvýšením teploty. Druhým je netepelný alebo biologický efekt, ktorý vyvoláva oxidačný stres, genetické poškodenie, zmenu bunkových membrán a mnoho ďalších zmien na bunkovej úrovni (Hinrikus a kol. 2005; Beljajev 2009; Pilla 2012; Park a kol. 2014; Pall 2016; Ibitayo a kol. 2017; Zhi a kol. 2017; Das 2020; Roy a kol. 2021). Typ reakcie živých systémov na vystavenie blízkeho infračervenému žiareniu sa líši a do značnej miery závisí od frekvencie, sily, vzdialenosti a trvania indukovaných polí, ako aj od polohy zdroja blízkeho infračerveného žiarenia od biologického objektu. Priestorové rozloženie polí v biologických systémoch a ich ďalšie interakcie s tkanivami sú výrazne ovplyvnené charakterom živej hmoty. Bežné frekvencie bezdrôtových štandardov 2G, 3G, 4G a 5G sú schopné preniknúť niekoľko centimetrov hlboko do...

Obr. 3 Reprezentatívne mikrofotografie hlavy **A** a telesná dutina **B** 9-dňového kuracieho embrya v skupine Wi-Fi, s – vývoj kože, e – vývoj oka, n – vývoj nosovej dutiny, t – vývoj jazyka, c – chrupavkový model dolnej čeľuste, h – vývoj srdca, l – vývoj pečene, l' – vývoj pľúc, m – vývoj metanefrózy, m' –

– vyvíjajúci sa mezonefros, g – vyvíjajúca sa pohlavná žľaza (HE, zväčšenie 20 ×)



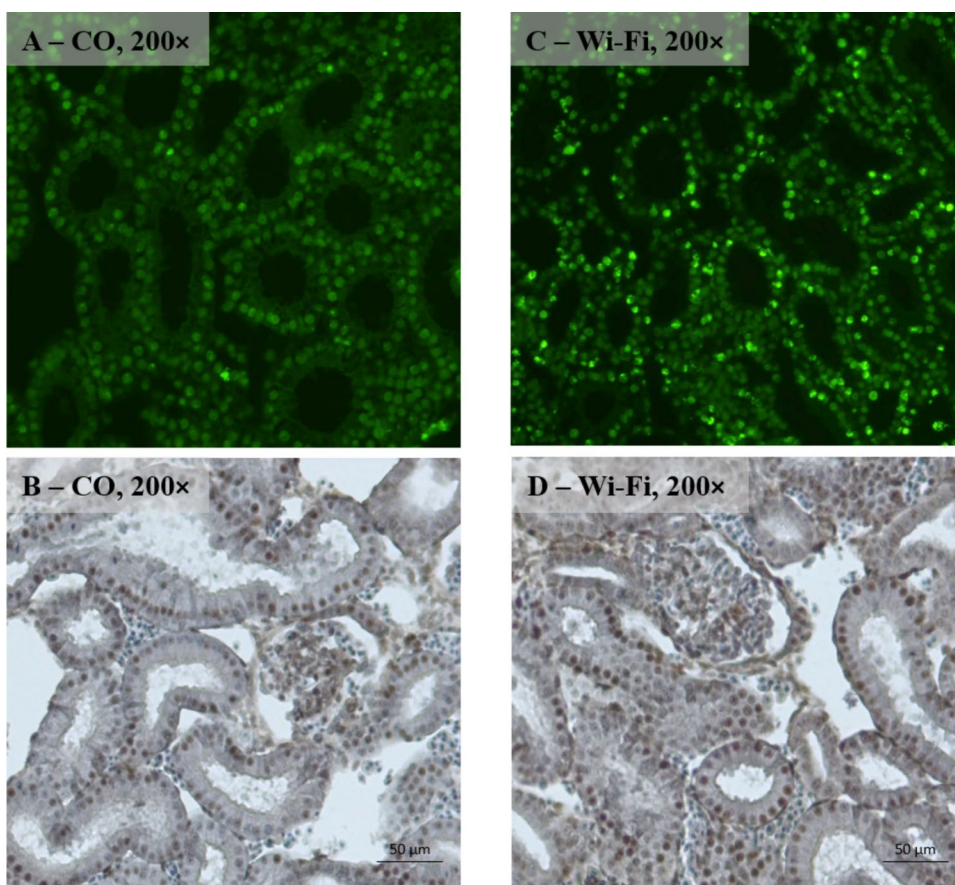
Obr. 4 Reprezentatívne mikrofotografie mezonefrózy 9-dňového kuracieho embrya v kontrolnej skupine a skupine s Wi-Fi **A-F**.
 * — obličkové telieska s typickou štruktúrou, ≠ — zdvojené obličkové telieska, □ — obličkové telieska s úplne dezintegrovanou štruktúrou, ¥ — nekrotizujúce bunky, c — prekrvené cievy, μ — fokálna fyziologická degenerácia mezonefrického parenchýmu (HE, zväčšenie 200 × a 400 ×)



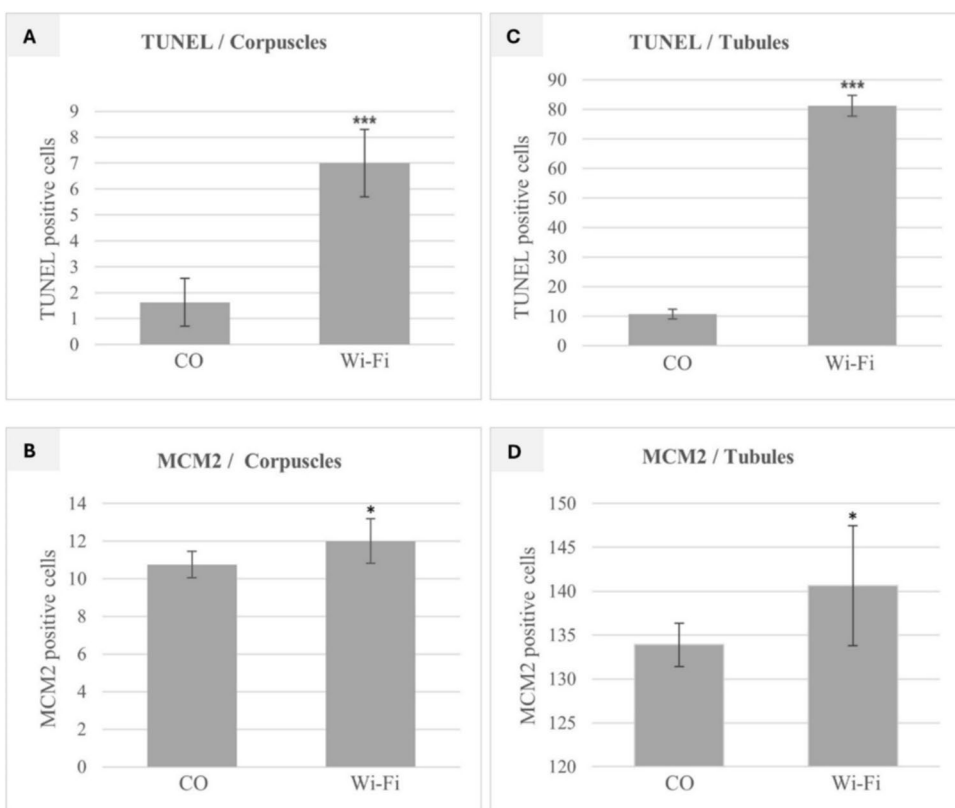
tkanivá a sú nimi absorbované s následným uvoľnením energie. Vo všeobecnosti nižšie frekvencie NIR prenikajú hlbšie do tkanív (Beljaev 2009 Mild a kol. 2019 Das 2020 Roy a kol. 2021 Živé telo sa vo všeobecnosti dokáže adaptovať na malé a dočasné zvýšenie teploty, ale za špecifických podmienok, ako je malá vzdialenosť biologického objektu od zdroja žiarenia, vysoký obsah vody v tkanive alebo prítomnosť anatomických štruktúr, ktoré bránia efektívnemu odvodu tepla z tkanív, v dôsledku čoho zlyhávajú termoregulačné mechanizmy organizmu a môže dôjsť k celkovému prehriatiu alebo k tzv. horúcim miestam (Adair a Black) 2003). Pretože

Možnosti merania zvýšenia teploty špecifických tkanív spôsobeného kontrolovaným vystavením experimentálnemu NIR žiareniu sú veľmi obmedzené a v mnohých prípadoch úplne nemožné, pričom nie je možné určiť, či sú zmeny v tkanivách spôsobené tepelným alebo netepelným účinkom NIR. V tejto štúdii sme sa zamerali na vyhodnotenie toho, ako vystavenie Wi-Fi s frekvenciou 2,4 GHz pri nízkej intenzite 200 – 500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$...2, čo je výrazne pod povolenými limitmi pre pracovné prostredie (50 W/m^2) a široká verejnosť (10 W/m^2) expozície (ICNIRP) 2020 IEEE 2019), ovplyvní vývoj mezonefrosu kuracieho embrya počas 9-dňovej inkubačnej doby.

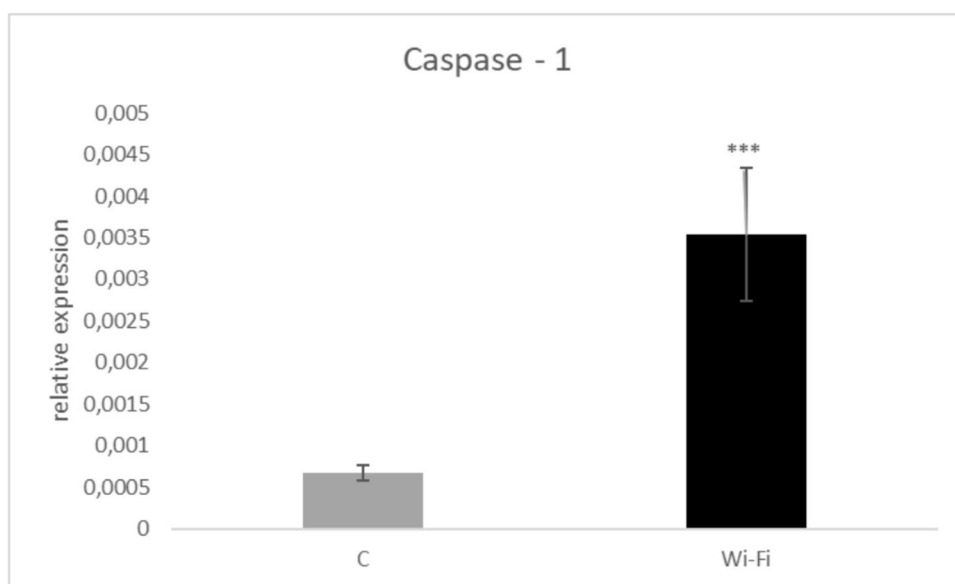
Obr. 5 Reprezentatívne mikrofotografie mezonefrosov s TUNELom **A**, **C** MCM2 **B**, **D** označenie (zväčšenie 200 ×)



Obr. 6 Počet TUNEL pozitívnych buniek v mezonefrických krvinkách **A** a mezonefrických tubulov **C**, s výrazným nárastom ($p < 0,001^{***}$) v počte TUNEL pozitívnych buniek v skupine Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou. MCM2 pozitívne bunky v mezonefrických krvinkách **B**, a mezonefrických tubulov **D**, s výrazným nárastom ($p < 0,05^*$) v počte MCM2 pozitívnych buniek v skupine Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou



Obr. 7 Relatívna génová expresia kaspázy-1 v mezonefros kuracích embryí kontrolnej skupiny a skupiny s Wi-Fi. Hviezdička označuje významné rozdiely medzi skupinami a časovými bodmi v *** $p < 0,001$



Obličky vtákov, podobne ako obličky cicavcov, sa vyvíjajú v troch po sebe nasledujúcich štádiách. Prvé a stredné štádium, pronefros a mezonefros, degenerujú a posledné štádium, metanefros, sa transformuje na definitívny orgán. Vtáčie mezonefros, hoci je len prechodnou štruktúrou, ponúka široké možnosti pre štúdium rôznych kmeňových buniek, ako aj priebehu ich diferenciácie. U vtákov sa stáva funkčným približne od 5. do 11. dňa inkubácie a postupne začína degenerovať od svojej lebečnej smerom k kaudálnemu koncu (Bellairs a Osmond 2014).

Na úrovni konvenčnej svetelnej mikroskopie sme okrem fyziologickej sa vyskytujúcej degenerácie mezonefrózy v kontrolnej aj Wi-Fi skupine zaznamenali aj mierne, difúzne degeneratívne zmeny v mezonefróznom parenchýme. V týchto patologicky zmenených oblastiach sme zaznamenali úplný štrukturálny rozpad niektorých mezonefrózných teliesok, zvýšený počet duplikovaných obličkových teliesok, ako aj zvýšený počet nekrotizujúcich buniek. Okolité interstícium obsahovalo mnoho prekrvených ciev. Na základe pozorovaných zmien, najmä prekrvenia ciev, ktoré možno považovať za aktiváciu tkanivových termoregulačných mechanizmov, sme predpokladali, že v tkanive mezonefrózy došlo v dôsledku vplyvu vlnovej dĺžky pri špecifickej hustote výkonu NIR použitej v tomto 9-dňovom experimente k tepelnému efektu. Následné štrukturálne zmeny naznačovali stredne závažné poškodenie mezonefrózy, čo poukazuje na skutočnosť, že aj keď neboli prekročené bezpečnostné limity pre kontrolovanú expozíciu, mali by sa zvážiť účinky NIR na organogénu a celkový prenatálny vývoj vtákov. Silným argumentom je fakt, že celý embryonálny vývoj vtáka prebieha vo vajci, kde jednotlivé vrstvy, ako napríklad bielok a škrupina, môžu brániť účinnému odstráneniu

nahromadeného tepla z embryonálnych tkanív. Podobný jav bol pozorovaný v našom predchádzajúcom experimente, kde boli dospelé potkany vystavené NIR s frekvenciou 2,45 GHz a hustotou výkonu 28 W/m² počas 3 hodín denne počas 3 týždňov dochádzalo k prekrveniu testikulárnych ciev (Almášiová a kol. 2017). Iní autori zaznamenali tento jav najmä v orgánoch, ktoré sú obzvlášť citlivé na tepelný účinok kvôli svojej špecifickej anatómii, ako je vysoké množstvo vody, výrazná vláknitá kapsula a povrchové umiestnenie v organizme, ako sú semenníky, oči, slinné žľazy alebo mozog (Deshmukh a kol. 2015 Šahin a kol. 2015 Dasdag a Akdag 2016; Zhi a kol. 2017 Wainwright 2000).

Mnohé vedecké experimenty preukázali zmeny na bunkovej úrovni, ktoré sa pripisujú netermálnemu účinku NIR pri hustotách výkonu hlboko pod povolenými ochrannými limitmi. Patrili medzi ne poškodenie DNA, oxidačný stres, zvýšený intracelulárny vápnik, zvýšená expresia stresových proteínov, zvýšená apoptóza a zmeny v proliferácii buniek (Hinrikus a kol. 2005 Beljajev 2009 Deshmukh a kol. 2015 Šahin a kol. 2015 Dasdag a Akdag 2016 Othman a kol. 2018 Das 2020). Najmä prenatálny vývoj je kritickým obdobím života, ktoré sa vyznačuje extrémnou citlivosťou vyvíjajúcich sa tkanív a orgánov na rôzne rizikové faktory prostredia vrátane NIR (Lee a kol. 2014 Zhang a kol. 2016 Šalvia a Burgio 2017 Othman a kol. 2018), ktoré nesmie zostať bez povšimnutia a zaslúži si náležitú pozornosť.

V súlade s vyššie uvedenými zisteniami sme v súčasnom experimente pozorovali aj štatisticky významné zmeny v proliferácii, ako aj apoptóze embryonálnych buniek. Počet apoptotických buniek bol semikvantitatívne vyhodnotený pomocou sofistikovaného TUNEL testu, ktorý deteguje zlomy reťazca DNA v tkanivových rezoch. Všimli sme si, že v skupine s Wi-Fi bol zistený významný nárast ($p < 0,001$) v...

miera apoptózy v porovnaní s kontrolnou skupinou. Všeobecne je známe, že apoptóza hrá dôležitú úlohu v mnohých fyziologických stavoch vrátane normálneho vývoja tkanív a organogenézy a vyváženia mitotického delenia. Nadmerná bunková smrť, ktorá bola vyvolaná v dôsledku NIR, však môže nakoniec viesť k škodlivej strate buniek s následným narušením normálnej štruktúry, ako aj fungovania orgánu. Na druhej strane, najmä počiatočné vývojové štádiá sú charakterizované intenzívnou proliferáciou embryonálnych buniek, ktoré sa potom diferencujú a tvoria špecializované typy buniek. Ako sa bunky postupne diferencujú, ich rýchlosť proliferácie sa zvyčajne znižuje a väčšina buniek u dospelých je zastavená v štádiu G0 bunkového cyklu. V tomto experimente sme použili MCM2 (Minichromosome Maintenance Protein) ako dôležitého účastníka replikácie DNA na demonštráciu proliferujúcich buniek v parenchýme mezonefrózy. Semikvantitatívne hodnotenie MCM2 pozitívnych buniek v mezonefrických tubuloch a krvinkách odhalilo ich významný ($p < 0,05$) nárast v skupine Wi-Fi v porovnaní s kontrolnou skupinou, čo je v súlade so zisteniami Lee a kol. (2014), ktorí vo svojej štúdii in vitro vykonanej na kmeňových bunkách odvodených z tukového tkaniva pozorovali vyššiu mieru proliferácie v dôsledku Wi-Fi signálu.

Podľa našich vedomostí ide o prvú experimentálnu štúdiu, ktorá skúmala vplyv Wi-Fi na histologickú štruktúru a ďalšie vybrané parametre kuracieho mezonefróza. Nový prístup spočíval aj v zameraní sa na monitorovanie vplyvu Wi-Fi žiarenia na génovú expresiu kaspázy-1. Kaspázy sú vo všeobecnosti cysteínové proteázy, ktoré pôsobia buď v procese apoptózy, alebo počas zápalových reakcií, ako napríklad kaspáza-1. Kaspáza-1 je súčasťou cytosolického multiproteínového inflamazómového komplexu (NALP3), ktorý predstavuje prvú obrannú líniu počas bunkového stresu a je jednou z dôležitých zložiek vrodenej imunity (Molla a kol.2020Sahoo a kol.2024). V súlade s predchádzajúcim tvrdením naše výsledky preukázali negatívny vplyv vystavenia sa žiareniu Wi-Fi, čo sa prejavilo zvýšenou reguláciou génovej expresie kaspázy-1 v embryonálnom mezonefróze, čo môže naznačovať výskyt bunkového stresu a spustenie potenciálnej zápalovej reakcie. Okrem toho sú embryonálne bunky mimoriadne citlivé na oxidačný stres v dôsledku intenzívneho bunkového delenia a sprievodnej expozície ich DNA (Aouache a kol.2018). Naše výsledky môžu naznačovať, že žiarenie Wi-Fi sa podieľa na vývoji nežiaducej zápalovej reakcie. Podobne Vafaei a kol. (2020) zistili, že Wi-Fi žiarenie zvyšuje oxidačný stres, ako aj stupeň apoptózy v placentárnom tkanive u myši. Na druhej strane sa väčšina autorov zamerala najmä na monitorovanie vplyvu Wi-Fi žiarenia na aktivitu kaspázy-3 alebo kaspázy-8 a 9 vo vzťahu k apoptóze u embryí.

(Cig a Naziroglu2015Saygin a kol.2018Włodarczyk a Nowicka2019). Preto predpokladáme, že naše výsledky môžu tiež rozšíriť súčasné poznatky o vplyve Wi-Fi žiarenia na génovú expresiu kaspázy-1 u kuracích embryí. Potvrdilo sa však, že zvýšená génová expresia kaspázy-1 sa pozorovala nielen v plodovej vode tehotných žien (Maneta a kol.2015), ale aj u kuracích embryí v 12. a 15. deň embryogenézy (Grzegorzewska2012).

V našej štúdii sme skúmali vplyv Wi-Fi žiarenia na organogenézu mezonefrosu u kuracích embryí, najmä z morfológického hľadiska. Hodnotili sme tiež úroveň nekrotizácie buniek, proliferácie a relatívnej génovej expresie pre kaspázu-1 v rámci sledovaných skupín. Permanentná Wi-Fi expozícia na frekvencii 2,4 GHz a hustote výkonu 200–500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ z od prvého do deviateho dňa inkubácie embrya spôsobilo mierne, difúzne degeneratívne zmeny, ako aj zvýšenie proliferácie, apoptózy a relatívnej génovej expresie kaspázy-1 v parenchýme mezonefrósu. Všetky pozorované zmeny jasne naznačovali poškodenie vyvíjajúceho sa tkaniva obličiek a preukázali spustenie potenciálnej zápalovej tkanivovej odpovede. Prekrvenie krvných ciev v intersticiu tiež podporilo predpoklad, že v tkanive mezonefrósu bol indukovaný tepelný efekt, aj keď neboli prekročené bezpečnostné limity pre NIR. Hoci výsledky našej štúdie nemožno priamo extrapolovať na ľudí, pozorované výsledky predstavujú potenciálne zdravotné riziko a naznačujú potrebu dodržiavať tzv. zásady preventívnej opatrnosti a zvážiť riziko nadmernej expozície zdrojom NIR u detí, dospievajúcich a najmä počas tehotenstva.

PodakovaniaTúto štúdiu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky VEGA 1/0036/22.

Príspevky autorovVšetci autori prispeli ku koncepcii a dizajnu štúdie. Odber vzoriek tkaniva, spracovanie a vyhodnotenie materiálu, ako aj analýzu údajov vykonali [Viera Almášiová], [Katarína Holovská], [Sandra Andrašková], [Patrícia Hudáková], [Štefan Tóth] a [Viera Karaffová]. Technickú podporu – inštaláciu a nastavenie Wi-Fi zariadenia a meranie intenzity žiarenia vykonal [Ján Molnár]. Prvý návrh rukopisu napísala [Viera Almášiová]. Všetci autori si prečítali a schválili finálnu verziu rukopisu.

FinancovanieFinancovanie s otvoreným prístupom poskytuje Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v spolupráci s Centrom vedecko-technických informácií Slovenskej republiky. Túto štúdiu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky VEGA 1/0036/22.

Dostupnosť údajovPočas aktuálnej štúdie neboli vygenerované ani analyzované žiadne súbory údajov.

Vyhlasenia

Etické schválenie Podľa smernice 2010/63/EÚ si použitie kuracích embryí ako zvieracieho experimentálneho modelu nevyžaduje schválenie etickou komisiou.

Protirečiaci záujmy Autori vyhlasujú, že nemajú žiadne konkurenčné záujmy.

Otvorený prístup Tento článok je licencovaný pod medzinárodnou licenciou Creative Commons Attribution 4.0, ktorá povoľuje používanie, zdieľanie, adaptáciu, distribúciu a reprodukciu v akomkoľvek médiu alebo formáte, pokiaľ uvediete príslušný zdroj pôvodného autora (autorov) a zdroj, poskytnete odkaz na licenciu Creative Commons a uvediete, či boli vykonané zmeny. Obrázky alebo iný materiál tretích strán v tomto článku sú zahrnuté v licencií Creative Commons k článku, pokiaľ nie je v odkaze na materiál uvedené inak. Ak materiál nie je zahrnutý v licencií Creative Commons k článku a vaše zamýšľané použitie nie je povolené zákonnými predpismi alebo presahuje povolené použitie, budete musieť získať povolenie priamo od držiteľa autorských práv. Ak si chcete zobrazit kópiu tejto licencie, navštívte stránku <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Referencie

- Abdel-Rassoul G, El-Fateh OA, Salem MA, Michael A, Farahat F, El-Batanouny M, Salem E (2007) Neurobehaviorálne účinky u obyvateľov v okolí základňových staníc mobilných telefónov. *Neurotoxicol* 28:434–440. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2006.07.012>
- Adair ER, Black DR (2003) Termoregulačné reakcie na RF Absorpcia energie. *Bioelectrom* 6:17–38. <https://doi.org/10.1002/bem.10133>
- Almášiová V, Holovská K, Šimaiová V, Beňová K, Raček A, Račeková E, Martončíková M, Mihálik J, Horváthová F, Tarabová L, Slanina T, Cigánková V (2017) The thermal effect of 2,45 GHz mikrovlnné radia on rat testes. *Acta Vet Brno* 86:413–419. <http://doi.org/10.2754/avb201786040413>
- Aouache R, Biquard L, Vaiman D, Miralles F (2018) Oxidačný stres pri preeklampsii a ochorení placenty. *Int J Mol Sci* 19:1496. <http://doi.org/10.3390/ijms19051496>
- Behari J (2010) Biologické reakcie na vystavenie frekvencií mobilných telefónov iste. *Indian J Exp Biol* 48:959–981
- Bellairs R, Osmond M (2014) Urino-genitálny systém. In: Bellairs R, Osmond M (eds.) *Atlas vývoja kurčiat*, 3. vydanie. Acad Press, Oxford, str. 67–76
- Beljajev I. (2009) Netermálne biologické účinky mikrovln: prúd-znalosti o prenájme, ďalšia perspektíva a naliehavé potreby. *Electrom Biol Med* 24:375–403. <https://doi.org/10.1080/15368370500381844>
- Cig B, Naziroglu M (2015) Skúmanie vplyvov vzdialenosti zo zdrojov o apoptóze, oxidačnom strese a akumulácii vápnika v cytozole prostredníctvom kanálov TRPV1 indukovaných mobilnými telefónmi a Wi-Fi v bunkách rakoviny prsníka. *Bioch Biophys Acta* 1848:2756–2765. <https://doi.org/10.1016/j.bbame.2015.02.013>
- Das D (2020) Mikrovlnné žiarenie a jeho vplyv na ľudské telo: recenzia. *Int J Innov Res Multidisc Field* 6:2455–0620 (IJIRMF202001019.pdf)
- Dasdag S, Akdag MZ (2016) Prepojenie medzi rádiovými frekvenciami vyžarovanými z bezdrôtových technológií a oxidačného stresu. *J Chem Neuroanat* 75:85–93. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2015.09.001>
- Boever S, Vangestel C, De Backer P, Croubels S, Sys SU (2008) Identifikácia a validácia génov pre domácnosti ako vnútornej kontroly génovej expresie pri intravenóznom zápale LPS model u kurčiat. *Vet Immunol Immunopathol* 122:312–317. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2007.12.002>
- Deshmukh PS, Nasare N, Megha K, Banerjee BD, Ahmed RS, Singh D, Abegaonkar MP, Tripathi AK, Mediratta PK (2015) Kognitívne poškodenie a neurogenotoxické účinky u potkanov vystavených mikrovlnnému žiareniu s nízkou intenzitou. *Int J Toxicol* 34:284–290. <https://doi.org/10.1177/1091581815574348>
- Foletti A, Ledda M, De Carlo F, Grimaldi S, Lisi A (2010) Vápnik Iónová cyklotrónová rezonancia (ICR), vystavenie magnetickému poľu 7,0 Hz, 9,2 mikroT iniciuje diferenciáciu buniek AtT20 D16V odvodených z hypofyzárneho kortikotropu. *Electrom Biol Med* 29:63–71. <https://doi.org/10.3109/15368378.2010.482480>
- Grzegorzewska AK (2012) Expresia kaspázy-1 a kaspázy-3 mRNA vo vyvíjajúcom sa a regresujúcom vaječníku kuracieho embrya. *Acta Biol Cracoviensia* 53:53–58
- Grzegorzewska AK, Lis MW, Sechman A (2016) Immunolokalizácia Expresia leptínového receptora a mRNA leptínových a estrogénových receptorov, ako aj kaspáz v chorioalantoickej membráne (CAM) kuracieho embrya. *Folia Biol* 64:79–87. https://doi.org/10.3409/fb64_2_79
- Hinrikus H, Bachmann M, Tomson R, Lass J (2005) Netermálne vplyv mikrovlnného žiarenia na ľudský mozog. *Environment* 25:187–194. <https://doi.org/10.1007/s10669-005-4282-x>
- Ibitayo AO, Afolabi OB, Akinyemi AJ, Ojiezeh TI, Adekoya KO, Ojewunmi OO (2017) RAPD profilovanie, fragmentácia DNA a histomorfometrické vyšetrenie v mozgoch potkanov Wistar vystavených žiareniu z vnútorných Wi-Fi zariadení s frekvenciou 2,5 GHz. *Biomed Res Int* 2017:8653286. <https://doi.org/10.1155/2017/8653286>
- Medzinárodná komisia pre neionizujúce žiarenie ochrana (2020) Zásady ochrany pred neionizujúcim žiarením. *Health Phys* 118:477–482. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001252>
- IEEE (2019) Norma pre úroveň bezpečnosti s ohľadom na expozíciu človeka vystavené elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým poľami, 0 Hz až 300 GHz. In: IEEE Std C95.1–2019 (revízia IEEE Std C95.1–2005/zahrňá IEEE Std C95.1–2019/korekcia 1–2019). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679>
- Karaffová V, Marcinková E, Bobíková K, Herich R, Revajová V, Stašová D, Kavulová A, Levkutová M, Levkut M Jr, Lauková A, Ševčíková Z, Levkut M Sr (2017) Expresia TLR4 a TLR21, MIF, IFN- β , MD-2, aktivácia CD14 a produkcia sIgA u kurčiat, ktorým bol podávaný kmeň EFAL41 jejuniob. *Folia Microbiol* 62:89–97. <https://doi.org/10.1007/s12223-016-0475-6>
- Latendresse JR, Warbritton AR, Jonassen H, Creasy DM (2002) Fixácia semenníkov a očí pomocou modifikovanej Davisonovej tekutiny: porovnanie s Bouinovou a konvenčnou Davisonovou tekutinou. *Toxicol Pathol* 30:524–533. <https://doi.org/10.1080/01926230290105721>
- Lee SS, Kim HR, Kim MS, Park SH, Kim DW (2014) Vplyv Wi-Fi signály smartfónov na kmeňových bunkách odvodených z tukového tkaniva. *J Craniofac Surg* 25:1902–1907. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000000939>
- Maneta E, Warren AY, Hay DP, Khan RN (2015) Sprostredkované kaspázo-1 uvoľňovanie cytokínov z gestačných tkanív, placenty a pľúcnicovej krvi. *Front Physiol* 6:186. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00186>
- Mierni KH, Lundström R, Wilén J (2019) Neionizujúce žiarenie v Švédska zdravotná starostlivosť – aspekty expozície a bezpečnosti. *Int J Environ Res Public Health* 16:1186. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071186>
- Molla MD, Akalu Y, Geto Z, Dagnew B, Ayelign B, Shibabaw T (2020) Úloha kaspázy-1 v patogenéze chronických neinfekčných ochorení spojených so zápalom. *J Inflamm Res* 13:749–764. <https://doi.org/10.2147/JIR.S277457>
- Othman H, Ammari M, Rtibi K, Bensaid N, Sakly M, Abdelmelek H. (2018) Postnatálny vývoj a účinky správania v maternici

- vystavenie potkanov rádiovlnovým vlnám vysielaným z konvenčných WiFi zariadení. *Environ Toxicol Pharmacol* 52:239–244. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.04.016>
- Pall ML (2016) Mikrovlnné frekvenčné elektromagnetické polia (EMF) vyvolávajú rozsiahle neuropsychiatrické účinky vrátane depresie. *J Chem Neuroanat* 75:43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jch.2015.08.001>
- Pall ML (2018) Wi-Fi predstavuje významnú hrozbu pre ľudské zdravie. *Životné prostredie* Zjavenie 164:405–416. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035>
- Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL (2015) Polarizácia: kľúč Rozdiel medzi umelo vytvorenými a prírodnými elektromagnetickými poliami, pokiaľ ide o biologickú aktivitu. *Sci. Rep* 5:14914. <https://doi.org/10.1038/srep14914>
- Park HK, Lee JE, Lim JF, Kang BH (2014) Mitochondriálne Hsp90 supstlačiť vápnikom sprostredkované stresové signály šíriace sa z mitochondrií do ER v rakovinových bunkách. *Mol Cancer* 13:148. <https://doi.org/10.1186/1476-4598-13-148>
- Pilla AA (2012) Elektromagnetické polia okamžite modulujú signalizáciu oxidu dusnatého v infikovaných biologických systémoch. *Biochem Biophys Res Commun* 28:330–333. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2012.08.078>
- Redmayne M, Johansson O (2015) Vystavenie rádiovlnovému žiareniu u mladých ľudí a starí: rôzna citlivosť vzhľadom na prirodzené rozdiely súvisiace s vekom. *Rev Environ Health* 30:323–335. <https://doi.org/10.1515/reveh-2015-0030>
- Roy B, Niture S, Wu MH (2021) Biologické účinky nízkeho výkonu neionizujúce žiarenie: naratívna recenzia. *J Radiat Res Imaging* 1:1–23. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.15557>
- Sage C, Burgio E (2017) Elektromagnetické polia, pulzná rádiovlnová žiarenie a epigenetika: ako môžu bezdrôtové technológie ovplyvniť vývoj detstva. *Child Dev* 89:129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>
- Sahoo G, Samal D, Khandayataray P, Murthy MK (2024) Recenzia o kaspázach: kľúčové regulátory biologických aktivít a apoptózy. *Mol Neurobiol* 60:5805–5837. <https://doi.org/10.1007/s12035-023-03433-5>
- Saygin M, Ozmen O, Erol O, Ellidag HY, Ilhan I, Aslankoc R (2018) Vplyv elektromagnetického žiarenia (2,45 GHz, Wi-Fi) na ženský reprodukčný systém: Úloha vitamínu C. *Toxicol Industr Health* 34:620–630. <https://doi.org/10.1177/0748233718775540>
- Shahin S, Banerjee S, Singh SP, Chaturvedi CM (2015) 2,45 GHz mikrovlnné žiarenie zhoršuje učenie a priestorovú pamäť prostredníctvom oxidačného/nitrozatívneho stresu indukovaného p53-dependentným/nezávislým apoptóza hipokampu: molekulárny základ a základný mechanizmus. *Toxicol Sci* 148:38099. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv205>
- Ubada A, Trillo MA, Chacón L, Blanco MJ, Leal J (1994) Chick Vývoj embrya môže byť nezvratne zmenený skorým vystavením slabým magnetickým poliam s extrémne nízkou frekvenciou. *Bioelectromagn* 15:385–398. <https://doi.org/10.1002/bem.2250150503>
- Izadi HR, Zare Dorahi Z, Dianatpour M, Danesh-Parvar A, Jamhiri I (2020) Wi-Fi (2,4 GHz) ovplyvňuje antioxidačnú kapacitu, expresiu génov pre opravu DNA a apoptózu u gravidných myši s placentami. *Iran J Basic Med Sci* 23:833–840. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2020.40184.9512>
- Van Boxem K, Huntoon M, Van Zundert J, Patijn J, van Kleef M, Joosten EA (2014) Pulzná rádiovlnová frekvencia: prehľad základných vedeckých poznatkov aplikovaných na patofyziológiu radikálnej bolesti: výzva na klinický preklad. *Reg Anesth Pain Med* 39:149–159. <https://doi.org/10.1097/AAP.000000000000063>
- Wainwright P (2000) Tepelné účinky žiarenia z mobilných telefónov. *Fyzikálna a lekárska biológia* 45:2363. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/8/321>
- Włodarczyk M, Nowicka G (2019) Obezita, poškodenie DNA a vývoj rozvoj ochorení súvisiacich s obezitou. *Int J Mol Sci* 20:E1146. <https://doi.org/10.3390/ijms20051146>
- Woelders H, de Wit A, Lourens A, Stockhofe N, Engel B, Hulsegeer I, Schokker D, van Heijningen P, Vossen S, Bekers D, Zwamborn P (2017) Štúdia potenciálnych zdravotných účinkov elektromagnetických polí telefónie a Wi-Fi s použitím vývoja kuracieho embrya ako zvieracieho modelu. *Bioelectromagn* 38:186–203. <https://doi.org/10.1002/bem.22026>
- Xu F, Bai Q, Zhou K, Ma L, Duan J, Zhuang F et al (2016) Závisť od veku-akútne ovplyvňovanie proliferácie kmeňových a progenitorových buniek v hipokampe po vystavení elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 1800 MHz. *Electromagn Biol Med* 36:158–166. <https://doi.org/10.1080/15368378.2016.1233886>
- Zhang J, Li M, Kang ET, Neo KG (2016) Elektrická stimulácia Mezenchymálne kmeňové bunky odvodené z tukového tkaniva vo vodivých štruktúrach a úloha napätovo riadených iónových kanálov. *Acta Biomater* 1:46–56. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.12.024>
- Zhi WJ, Wang LF, Hu XJ (2017) Nedávny pokrok v oblasti účinkov mikrovlnného žiarenia na mozog. *Milit Med Res* 4:29. <https://doi.org/10.1186/s40779-017-0139-0>

Poznámka vydavateľa Springer Nature zostáva neutrálny, pokiaľ ide o
jurisdikčné nároky na publikovaných mapách a inštitucionálne príslušnosti.