Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

International Journal of Molecular Sciences

MDPI

Článok

Rozdielne účinky vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu 3,5 GHz a 24 GHz 5G na sexuálne správanie samcov a reprodukčnú endokrinnú funkciu u potkanov

Atikah Hairulazam[1], Siti Fatimah Ibrahim[1,*], Khairul Osman[2], Mohd Helmy Mokhtar[1], Aini Farzana Zulkefli[1], Mohd Farisyam Mat Ros[1], Norazurashima Džamaludín[2], Syed Muhamad Asyraf Syed Taha[1], Sivasatyan Vijay[1], Zahriladha Zakaria[3], Amyrul Azuan Mohd Bahar[4] a Farah Hanan Fathihah Jaffar[1,*]

1 Ústav fyziológie, Lekárska fakulta, Universiti Kebangsaan Malajzia (UKM), Cheras 56000, Kuala Lumpur, Malajzia
2 Program forenzných vied, Centrum pre diagnostiku, liečbu a vyšetrovacie štúdie (CODTIS), Fakulta zdravotníckych vied, Univerzita Kebangsaan Malajzia (UKM), Jalan Raja Muda Abdul Aziz 50300, Kuala Lumpur, Malajzia
3 Fakulta elektroniky a počítačovej technológie a inžinierstva (FTKEK), Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM), Hang Tuah Jaya, Durian Tunggal 76100, Melaka, Malajzia
4 Intel Corporation, Jalan Sultan Azlan Shah, Bayan Lepas 11900, Pulau Pinang, Malajzia
* Korešpondencia: timi@ukm.edu.my (SFI); farahhanan@ukm.edu.my (FHFJ)

Abstrakt

Rýchle rozšírenie technológie 5G zvýšilo vystavenie vysokofrekvenčným rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF), čo vyvoláva obavy o reprodukčné zdravie mužov. Táto štúdia skúmala vplyv frekvencií 5G pri 3,5 GHz a 24 GHz na mužské libido, reprodukčné hormóny, pomer testosterónu k estrogénu (T/E) a expresiu androgénových receptorov u potkanov. Osemnásť samcov potkanov Sprague-Dawley bolo náhodne rozdelených do kontrolnej skupiny, skupiny s frekvenciami 3,5 GHz a 24 GHz (n = 6/skupina). Exponované skupiny dostávali 7 hodín denne expozíciu RF-EMF počas 60 po sebe nasledujúcich dní, zatiaľ čo kontrolná skupina podstúpila simulovanú expozíciu. Počas posledného týždňa expozície sa hodnotilo páriace správanie pomocou frekvencie párenia, latencie párenia, frekvencie intromisie, latencie ejakulácie a postejakulačného intervalu. Hodnotili sa hladiny testosterónu a estrogénu v sére, pomer T/E a expresia androgénových receptorov v semenníkoch a hypotalame. Skupina s frekvenciou 3,5 GHz preukázala štatisticky významne predĺženú latenciu ejakulácie (3480±1576,956, p<0,01, Hedges g= 1,03) v porovnaní s kontrolnou skupinou. Naproti tomu vystavenie frekvencii 24 GHz štatisticky významne znížilo frekvenciu montáží (4,80±0,837, p<0,01, Hedges g= −0,65) a predĺžil postejakulačný interval (588,83±206,41 s, p<0,01, Hedges g=1,63) v porovnaní s kontrolnou skupinou. Hormonálna analýza odhalila štatisticky významné zvýšenie hladín testosterónu v skupine s frekvenciou 3,5 GHz, zatiaľ čo skupina s frekvenciou 24 GHz vykazovala štatisticky významné zníženie hladín testosterónu a estrogénu. Expresia androgénnych receptorov zostala nezmenená. Tieto zistenia naznačujú frekvenčne závislé účinky 5G RF-EMF na mužské libido a endokrinnú rovnováhu.

Kľúčové slová:5G technológia; libido; mikrovlnná frekvencia; milimetrová vlnová frekvencia; estrogén; testosterón

Check for updates

Akademický redaktor: Yu-Chan Chang

Prijaté: 25. júna 2026
Revidované: 3. augusta 2026
Schválené: 5. augusta 2026
Publikované: 7. augusta 2026

Autorské práva:© 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, Švajčiarsko. Tento článok je článok s otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienokLicencia Creative Comm Attribution (CC BY).

1. Úvod

Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia (RF-EMF) generované modernými komunikačnými technológiami boli študované z hľadiska ich potenciálnych účinkov na biologické systémy [1–3].

Jedným zo systémov, ktorý bol rozsiahlo skúmaný, je mužský reprodukčný systém, pretože mužské pohlavné žľazy sa považujú za vysoko citlivé na vystavenie RF-EMF [4–7]. Bolo hlásené, že vystavenie RF-EMF bolo spojené so zmenami parametrov spermií vrátane motility [1], koncentrácia [8], morfológia a integrita DNA [9,10]. Hoci sa zistenia z rôznych štúdií líšia v dôsledku rozdielov v intenzite expozície, trvaní a dozimetrických technikách, rastúci počet dôkazov poukazuje na mužskú plodnosť ako potenciálne citlivý ukazovateľ expozície RF-EMF [11,12].

Väčšina predchádzajúcich štúdií hodnotila RF-EMF vysielané bezdrôtovou komunikačnou technológiou, ktorá zahŕňa nízkopásmové (900 MHz) až stredné pásmo frekvencie (2,45 GHz) [6,13–15Tieto frekvencie predstavujú skoršiu komunikačnú technológiu prijatú v sieťach 2G, 3G a 4G. S rýchlym prechodom na bezdrôtovú komunikačnú technológiu piatej generácie (5G) sa oblasť RF-EMF rozšírila o oveľa vyššie frekvencie, ktoré sa v predchádzajúcich komunikačných technológiách vo veľkej miere nepoužívali [16Okrem stredných frekvencií, ako je 3,5 GHz, ktoré spadajú pod mikrovlnné RF-EMF, sú vysoké frekvencie zavedené v 5G v rozsahu 24 – 28 GHz. Toto nové pásmo sa nazýva milimetrové vlny (mmWaves) [17,18 rokov].

Tieto vysokofrekvenčné pásma sa zásadne líšia od mikrovlnných frekvencií, čo sa týka hĺbky prieniku, vzorcov absorpcie energie a teda aj mechanizmov biologickej interakcie [19]. Zatiaľ čo mikrovlny môžu preniknúť do tkaniva do miernej miery, absorpcia milimetrových vĺn je obmedzená na povrch kože a povrchové biologické štruktúry [20,21Výskum biologických účinkov milimetrového vlnového žiarenia je však stále obmedzený, čo vytvára naliehavú potrebu starostlivo kontrolovaných experimentálnych štúdií.

Hoci sa uskutočnil rozsiahly výskum účinkov RF-EMF na mužský reprodukčný systém, väčšina štúdií sa primárne zamerala na morfológiu semenníkov a kvalitu spermií. V tejto štúdii sa hodnotil iný, ale rovnako dôležitý aspekt mužskej plodnosti, libido. Napriek svojej kľúčovej úlohe v úspešnej reprodukcii sa libidu ako behaviorálnej zložke venovala vo výskume RF-EMF oveľa menšia pozornosť.

Libido je základnou behaviorálnou zložkou mužskej plodnosti, ktorá zahŕňa komplexný proces sprostredkovaný nervovými a hormonálnymi mechanizmami [22]. Z hormonálneho hľadiska zohráva testosterón dôležitú úlohu pri udržiavaní sexuálnej túžby, schopnosti rozmnožovania a frekvencie párenia [23,24]. V rovnakej súvislosti, estrogén, ktorý sa produkuje hlavne aromatizáciou testosterónu, moduluje libido, sexuálne správanie a spätnú väzbu regulujúcich gonadotropíny [25,26Zmeny v týchto hormónoch sa preto môžu prejaviť zmenami v sexuálnej výkonnosti, aj keď parametre spermií zostanú nezmenené.

Okrem hladín hormónov v krvnom obehu závisí androgénna signalizácia kriticky od androgénnych receptorov (AR) v semenníkoch aj v hypotalame. V semenníkoch je väzba testosterónu na AR v Sertoliho bunkách a peritubulárnych myoidných bunkách nevyhnutná pre spermatogenézu a normálnu mužskú fertilitu. Medzitým v hypotalame a iných limbických oblastiach neuronálne AR integrujú testosterón na doladenie mužskej sexuálnej motivácie a výkonnosti [27,28]. Prerušenie AR signalizácie v týchto miestach zhoršuje spermatogenézu a znižuje páriace správanie, aj keď testosterón zostáva v normálnom rozmedzí, čo zdôrazňuje, že libido odráža nielen koncentrácie hormónov, ale aj citlivosť AR-dependentných dráh, ktoré spájajú os hypotalamus-hypofýza-gonády so sexuálnym správaním [27,29].

Pochopenie toho, ako frekvencie súvisiace s 5G ovplyvňujú libido, je nevyhnutné, pretože reprodukčné správanie mužov priamo určuje úspešnosť párenia a následné reprodukčné výsledky. Vzhľadom na globálne zavedenie komunikačnej technológie 5G môžu odlišné biofyzikálne charakteristiky frekvencií v mikrovlnnom pásme 3,5 GHz a mmvlnnom pásme 24 GHz vyvolať odlišné biologické reprodukčné reakcie. Porovnávacie štúdie hodnotiace vplyv týchto reprezentatívnych frekvencií 5G na sexuálne správanie mužov však zostávajú nedostatočné. Navyše, obmedzené štúdie skúmajúce zmeny sexuálneho správania vyvolané RF-EMF...

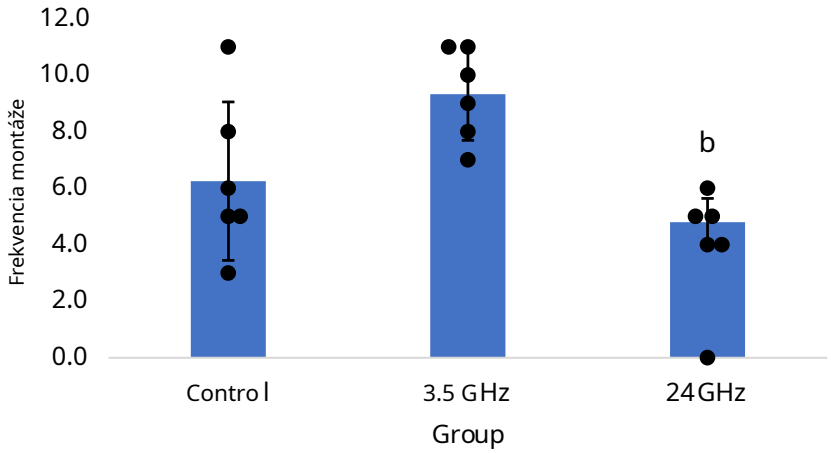
správanie a s ním spojená hormonálna regulácia boli obmedzené na frekvencie pod 2,5 GHz [30]. Aby sa lepšie zohľadnila reálna expozícia, v tejto štúdii sa použila predĺžená denná expozícia v trvaní 7 hodín, ktorá bola založená na priemernom dennom používaní internetu v Malajzii, ktoré je približne 5 až 8 hodín [31Hoci táto paradigma expozície nepredstavuje konkrétne pracovné prostredie, bola navrhnutá tak, aby simulovala dlhodobú dennú expozíciu, ktorej sú vystavení intenzívni používatelia zariadení pripojených na internet.

Therefore, the present study aimed to establish an experimental model to compare the effects of two representative 5G frequency bands, namely 3.5 GHz (microwave) and 24 GHz (mmWaves), on male sexual behaviour in Sprague–Dawley rats. In addition to assessing libido, serum testosterone, oestrogen, and AR expression were evaluated to determine whether behavioural alterations were accompanied by endocrine changes. By integrating behavioural and hormonal endpoints, this study provides a more comprehensive understanding of how emerging 5G frequencies may differentially influence male reproductive function beyond conventional assessments of sperm quality.

2. Results

2.1. Libido Parameter

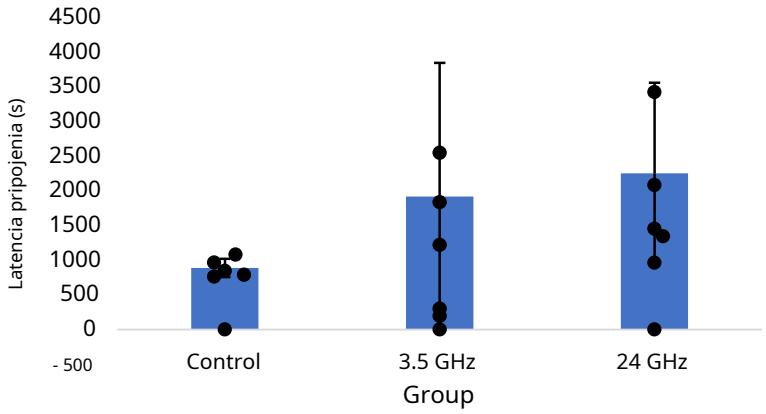
Data analysis demonstrated that the mount frequency (MF) did not show statistically significant differences between the exposed groups and the Control group (Figure 1). However, male rats that received 24 GHz exposure showed a statistically significant reduction in MF compared with 3.5 GHz ($p < 0.01$, Hedges' $g = -3.10$).



Experimental Group	Control (n = 6)	3.5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 5)
Mean	6.3	9.33	4.8 [b]
SD	2.80	1.63	0.837

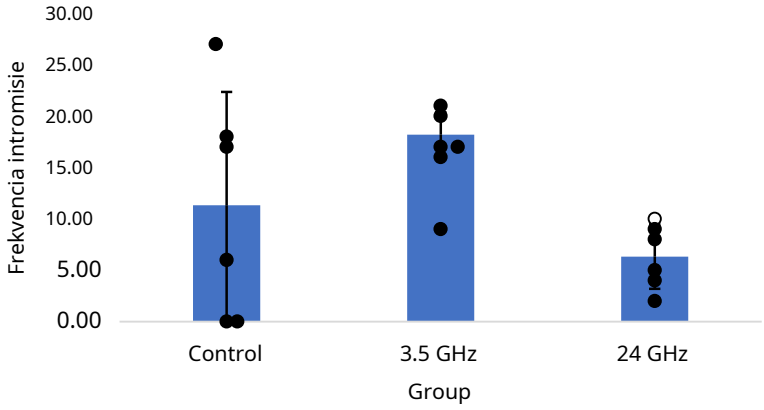
Figure 1. Mount frequency of male rats toward receptive females in each experimental group. Data are presented as mean ± standard deviation (SD). The sample sizes were Control (n = 6), 3.5 GHz (n = 6) and 24 GHz (n = 5). Individual data points represent individual animals. The corresponding group means and SDs are provided in the table below the graph. [b] indicates a statistically significant difference ($p < 0.01$, Hedges' $g = -3.10$) compared with the 3.5 GHz exposure group.

On the other hand, there were no statistically significant differences in mount latency (ML) (Figure 2) and intromission frequency (IF) (Figure 3) across the groups. However, the 24 GHz group demonstrated a noticeable downward trend relative to the 3.5 GHz-exposed group for both ML and IF.



Experimental Group	Control (n = 5)	3.5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 6)
Mean	888	1916	2253
SD	132.020	1928.968	1306.184

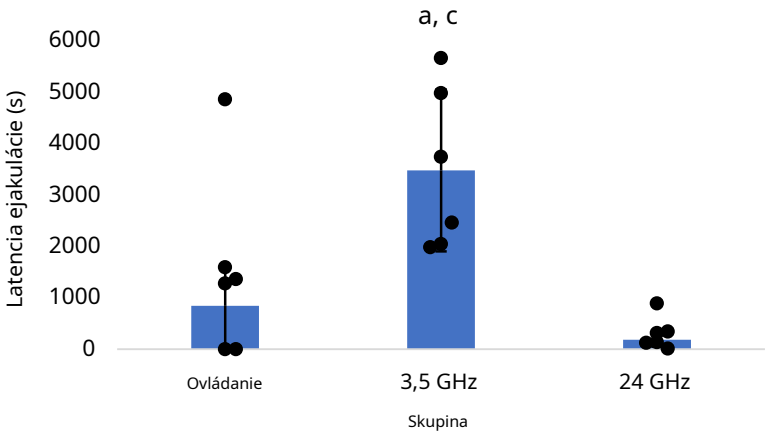
Figure 2. Mount latency of male rats toward receptive females in each experimental group. Data are presented as mean ± SD. The sample sizes were Control (n = 5), 3.5 GHz (n = 6), and 24 GHz (n = 6). Individual data points represent individual animals. The corresponding group means and SDs are provided in the table below the graph. No significant differences among the groups.



Experimental Group	Control (n = 6)	3.5 GHz (n = 5)	24 GHz (n = 6)
Mean	11.33	18.20	6.33
SD	11.021	2.168	3.141

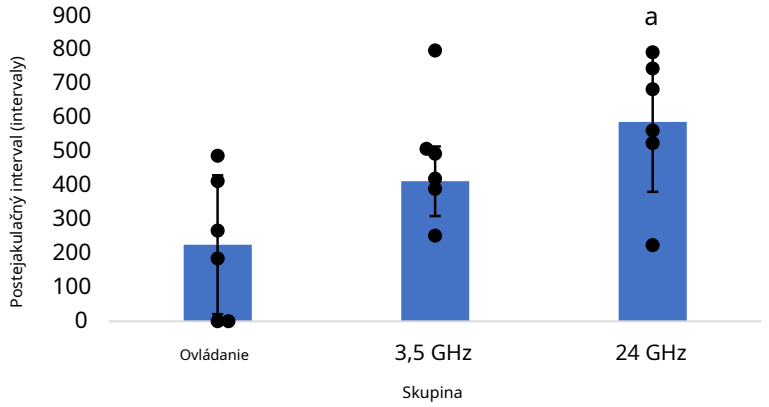
Figure 3. Intromission frequency of male rats toward receptive females in each experimental group. Data are presented as mean ± SD. The sample sizes were Control (n = 6), 3.5 GHz (n = 5) and 24 GHz (n = 6). Individual data points represent individual animals. The corresponding group means and SDs are provided in the table below the graph. No statistically significant differences among the groups.

Latencia ejakulácie (EL) bola štatisticky významne predĺžená v skupine s frekvenciou 3,5 GHz v porovnaní s kontrolnou skupinou (p<0,01, Hedges g=1,87) (Obrázok4). Naproti tomu skupina s frekvenciou 24 GHz vykazovala štatisticky významné zníženie EL v porovnaní so skupinou s frekvenciou 3,5 GHz (p<0,01, Hedges g= −2,56), čo naznačuje poruchu v načasovaní ejakulácie špecifickú pre frekvenciu expozície. Okrem toho bol postejakulačný interval (PEI) štatisticky významne dlhší v skupine vystavenej 24 GHz v porovnaní s kontrolnou skupinou (p<0,01, Hedges g= 1,63) (Obrázok5).



Experimentálna skupina	Ovládanie (n = 5)	3,5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 5)
Priemerný	846	3480a, c	185
ŠPZ	781,093	1576,956	140,015

Obrázok 4. Latencia ejakulácie samcov potkanov voči receptívnym samiciam v každej experimentálnej skupine. Údaje sú prezentované ako priemer.±SD. Veľkosti vzoriek boli kontrolná skupina (n = 5), 3,5 GHz (n = 6) a 24 GHz (n = 5). Jednotlivé dátové body predstavujú jednotlivé zvieratá. Zodpovedajúce priemery skupín a SD sú uvedené v tabuľke pod grafom.aznačuje štatisticky významný rozdiel (p<0,01, Hedges$g$= 1,87) v porovnaní s kontrolnou skupinou.cznačuje štatisticky významný rozdiel (p<0,01, Hedges$g$= −2,56) v porovnaní so skupinou vystavenou frekvencii 24 GHz.

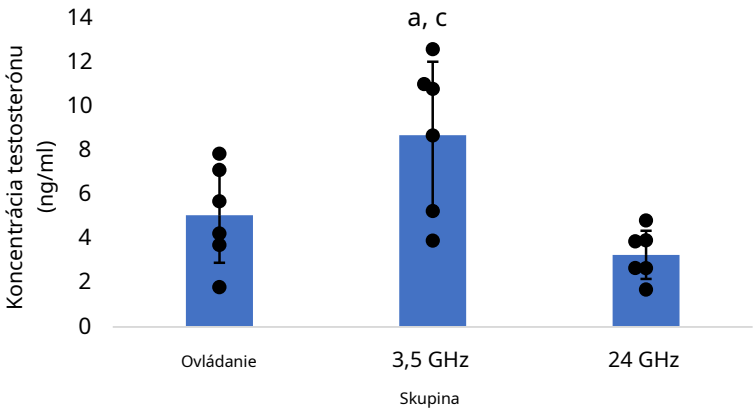


Experimentálna skupina	Ovládanie (n = 6)	3,5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 6)
Priemerný	226	413	588a
ŠPZ	204,512	102,573	206,411

Obrázok 5. Po ejakulácii ry inte rval mužského ra ts ťahanie ard receptívny fe muži v každej experimentálnej skupine. Údaje sú prezentované ako priemer±SD. Veľkosti vzoriek boli kontrolná skupina (n = 6), 3,5 GHz (n = 5) a 24 GHz (n = 6). Jednotlivé dátové body predstavujú jednotlivé zvieratá. Zodpovedajúce priemery skupín a SD sú uvedené v tabuľke pod grafom.aznačuje štatisticky významný rozdiel (p <0,01, Hedges$g$=1,63) v porovnaní s kontrolnou skupinou.

2.2. Sérový testosterón, estrogén a pomer T/E

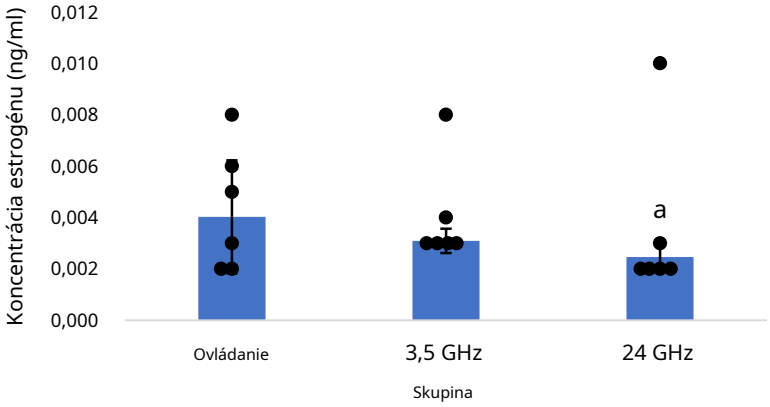
U potkanov vystavených frekvencii 3,5 GHz došlo k štatisticky významnému zvýšeniu hladín testosterónu v sére v porovnaní s kontrolnou skupinou (p<0,01, Hedges$g$=1.15) (Obrázok6). Hladina testosterónu v skupine vystavenej frekvencii 24 GHz však štatisticky významne klesla v porovnaní so skupinou vystavenou frekvencii 3,5 GHz (p<0,01, Hedges$g$= −1,95).



Experimentálna skupina	Ovládanie (n = 6)	3,5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 6)
Priemerný	5,0684	8,7086a, c	3,273
ŠPZ	2.160	3.336	1,093

Obrázok 6. Hladina koncentrácie testosterónu v sére pre každú experimentálnu skupinu. Údaje sú prezentované ako priemer.±SD (n = 6). Každý dátový bod predstavuje priemernú hodnotu získanú z duplicitných meraní jednotlivého zvieraťa. korrez Priemerné hodnoty a štandardné odchýlky pre skupiny zvažovania sú uvedené v tabuľku pod grafom.aoznačuje významnú súvislosť ficant rozdiel (p<0,01, Hedges g=1.15) porovnaný s kontrolnou skupinou.coznačuje štatistiku v spojenec si významný rozdiel (p<0,01, Hedges g= −0,27) porovnaní so skupinou s dávkou exp 24 GH.

Podobne aj estr ogenúrovne 2 4G Skupinová výstava Hz ed aštatisticky významné zníženie nárast v porovnaní s kontrolnou skupinou (p<0,01, Hedges g= −0,27) (Obrázok 7). Medzi skupinou s frekvenciou 3,5 GHz a kontrolnou skupinou však nebol žiadny rozdiel v hladine estrogénu.



Experimentálna skupina	Ovládanie (n = 5)	3,5 GHz (n = 5)	24 GHz (n = 5)
Priemerný	0,004	0,003	0,002a
ŠPZ	0,002	0,000	0,001

Obrázok 7. Hladina koncentrácie estrogénu v sére pre každú experimentálnu skupinu. Údaje sú prezentované ako priemer.±SD (n = 5). Každý dátový bod predstavuje priemernú hodnotu získanú z duplicitných meraní jednotlivého zvieraťa. Zodpovedajúce priemery a SD pre skupiny sú uvedené v tabuľke pod grafom.aznačuje štatisticky významný rozdiel (p<0,01, Hedges g= −0,27) v porovnaní s kontrolnou skupinou.

Okrem toho bol pomer T/E vypočítaný ako celkový testosterón vydelený celkovou koncentráciou estrogénu. Ako je uvedené v tabuľke 1, potkany vystavené frekvencii 3,5 GHz mali štatisticky

výrazne vyšší pomer T/E (2951±895,51,p<0,05, Hedges$g$=0,72) ako kontrolná skupina (1764±1449,42). Tento pomer sa však v skupine s frekvenciou 24 GHz výrazne znížil (1321 ±554,13,p<0,05, Hedges$g$= −1,46) v porovnaní so skupinou 3,5 GHz.

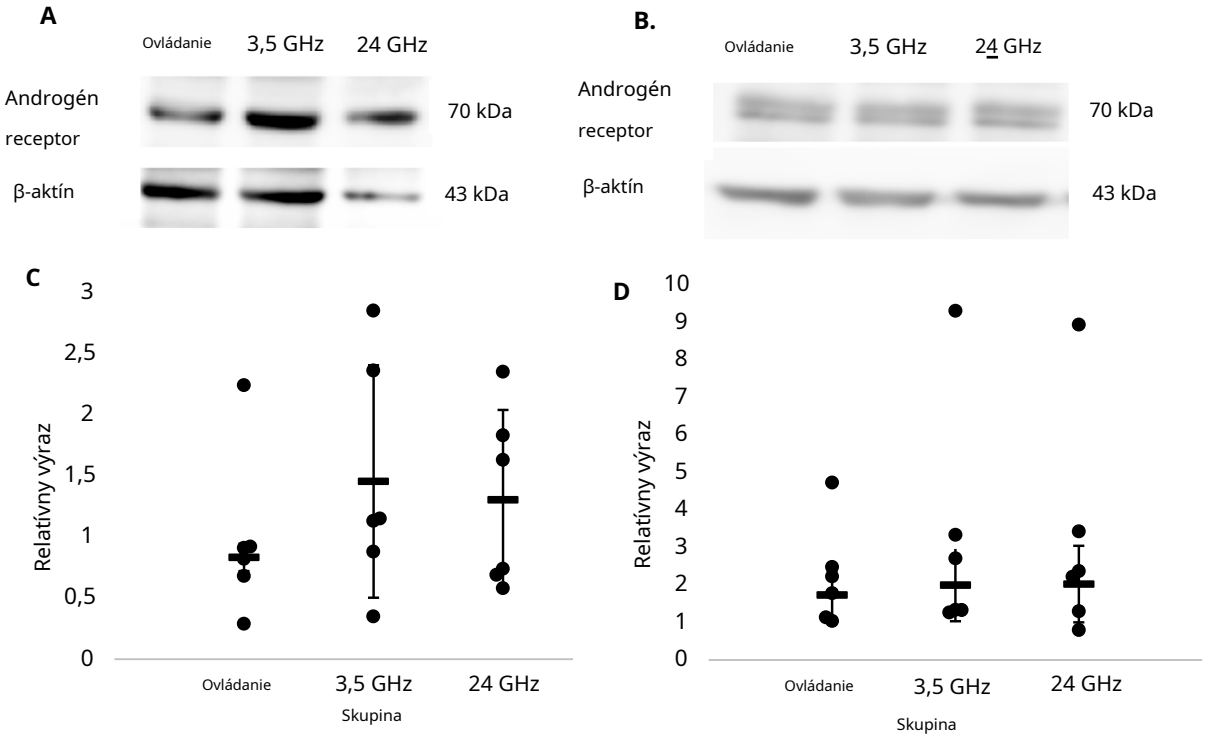
Tabuľka 1. Pomer T/E samcov potkanov v každej experimentálnej skupine. Údaje sú uvedené ako priemer.±Štandardná odchýlka (n = 6).

	Ovládanie (n = 6)	3,5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 6)
Pomer T/E	1765±1449,42	2951±895,51a	1321±554,13b

anaznačuje štatisticky významný rozdiel (p<0,05, Hedges$g$=0,72) v porovnaní s kontrolnou skupinou.bnaznačuje štatisticky významný rozdiel (p<0,05, Hedges$g$= −1,46) v porovnaní so skupinou vystavenou frekvencii 3,5 GHz.

2.3. Expresia androgénneho receptora

Obrázok8A a B znázorňujú reprezentatívne pásy Western blotu pre expresiu AR každej frekvencie v semenníkoch a hypotalame. Výsledky ukazujú, že medzi kontrolnou skupinou a skupinou s frekvenciou 3,5 GHz neboli žiadne štatisticky významné rozdiely v expresii AR v tkanive semenníkov.p=0,426) a 24 GHz (p=0,604) skupín (obrázok8C).



Tkanivo	Ovládanie (n = 6)	3,5 GHz (n = 6)	24 GHz (n = 6)
Semenník	0,83 ± 0,11	1,45 ± 0,95	1,30 ± 0,73
Hypotalamus	1,73 ± 0,64	1,998 ± 0,96	2,02 ± 1,02

Obrázok 8. Relatívna expresia androgénnych receptorov v semenníkoch a hypotalame pre každú experimentálnu skupinu. Reprezentatívne imunoblotové pásy pre hladiny expresie proteínov AR a β-aktínu pre (**A**) tkanivá semenníkov a (**B.**) tkanivá hypotalamu. (**C**) Relatívna expresia AR proteínu sa v semenníkoch normalizovaná na β-aktín. (**D**) Relatívna expresia AR proteínu normalizovaná na β-aktín v hypotalame. Jednotlivé dátové body predstavujú hodnoty z jednotlivých zvierat. Horizontálne čiary označujú priemery skupín a chybové úsečky predstavujú štandardnú odchýlku (priemernú hodnotu)±SD; n = 6 na skupinu). Deskriptívny priemer± Hodnoty štandardnej odchýlky pre každé tkanivo a experimentálnu skupinu sú uvedené v tabuľke pod grafmi.

Pokiaľ ide o expresiu hypotalamického AR, denzitometrická analýza podobne nepreukázala žiadne štatisticky významné rozdiely v normalizovaných hladinách AR proteínu medzi kontrolnou skupinou a skupinou s frekvenciou 3,5 GHz (p=0,887) alebo skupina 24 GHz (p=0,866) (Obrázok8D). Napriek tomu, že medzi skupinami nebol žiadny štatisticky významný rozdiel, vo všetkých expozičných skupinách sa pozoroval konzistentný trend smerom k zvýšenej relatívnej intenzite AR.

3. Diskusia

V súlade s odlišnými fyzikálnymi vlastnosťami dvoch frekvenčných rozsahov mala expozícia RF-EMF v mikrovlnnom a milimetrovom pásme odlišné účinky na sexuálne správanie mužov a reprodukčné endokrinné profily. Hoci obe exponované skupiny podstúpili rovnakú dĺžku expozície, behaviorálne a hormonálne reakcie neboli identické. To naznačuje, že biologické účinky RF-EMF môžu závisieť od použitej frekvencie, najmä pri porovnaní stredopásmovej mikrovlnnej frekvencie 3,5 GHz s novo zavedenou milimetrovou frekvenciou 24 GHz. Väčšina hodnotených parametrov však zostala porovnateľná s kontrolnou skupinou, čo naznačuje, že pozorované rozdiely boli obmedzené skôr na vybrané behaviorálne a hormonálne koncové body, než aby predstavovali rozsiahle zmeny v mužskej reprodukčnej funkcii.

V tejto štúdii bola EL štatisticky významne predĺžená v skupine s frekvenciou 3,5 GHz, zatiaľ čo MF, ML a PEI zostali porovnateľné s kontrolnou skupinou. EL je primárne riadený supraspinálnou moduláciou generátora spinálnej ejakulácie a závisí od súhry medzi facilitačnou dopaminergnou signalizáciou a inhibičnými serotonergnými dráhami v limbických a hypotalamických oblastiach [32,33Zistenie, že sa zmenila iba hladina EL, naznačuje, že vystavenie žiareniu s frekvenciou 3,5 GHz podstatne neovplyvnilo sexuálnu motiváciu ani začatie kopulačného správania. Namiesto toho môže predĺžená hladina EL odrážať jemné neurofyziologické zmeny v centrálnych dráhach koordinujúcich ejakuláciu.

Tento vzorec je v súlade so selektívnou zmenou mechanizmov kontroly ejakulácie, a nie so všeobecným potlačením mužského sexuálneho správania. Táto interpretácia však zostáva špekulatívna, keďže iné behaviorálne parametre neboli významne zmenené. Keďže ide o jednu z prvých štúdií, ktoré skúmajú vplyv frekvencií 3,5 GHz a 24 GHz na parametre mužského libida, budúce štúdie by mali ďalej skúmať neurobiologické mechanizmy, ktoré sú základom týchto behaviorálnych zmien, najmä potenciálne zapojenie centrálnych neurotransmiterových systémov a nervových okruhov spojených so sexuálnym správaním a reguláciou ejakulácie [32,34].

Vzhľadom na to, že mužské sexuálne správanie je silne ovplyvnené rovnováhou medzi testosterónom a estrogénom [24,35], zmeny v týchto hormónoch môžu prispievať k zmenám v kopulačnom výkone. V tejto štúdii boli hladiny testosterónu v sére štatisticky významne zvýšené v skupine s frekvenciou 3,5 GHz, zatiaľ čo hladiny estrogénu zostali porovnateľné s hladinami v kontrolnej skupine. Je zaujímavé, že podobné zvýšenie testosterónu v sére bolo pozorované v našej predchádzajúcej štúdii zahŕňajúcej chronické vystavenie žiareniu s frekvenciou 2,45 GHz, čo naznačuje, že dlhodobé vystavenie mikrovlnným frekvenciám môže ovplyvniť endokrinnú reguláciu [36].

V dôsledku zvýšenej koncentrácie testosterónu pri absencii zodpovedajúceho zvýšenia estrogénu sa v skupine s frekvenciou 3,5 GHz zvýšil aj pomer testosterónu k estrogénu (T/E). Pomer T/E sa považuje za dôležitý ukazovateľ hormonálnej rovnováhy, pretože androgénna aj estrogénna signalizácia prispieva k regulácii mužského sexuálneho správania [23,37]. Zvýšenie pomeru T/E preto naznačuje posun v rovnováhe cirkulujúceho androgénu a estrogénu po expozícii 3,5 GHz.

Napriek týmto hormonálnym zmenám zostal EL štatisticky významne predĺžený v skupine s frekvenciou 3,5 GHz. Toto zistenie naznačuje, že zvýšenie testosterónu a pomeru T/E sa nepremietlo do zlepšeného kopulačného výkonu. Okrem toho, AR proteín

Expresia v semenníkoch aj hypotalame sa štatisticky významne nelíšila od kontrolnej skupiny, čo naznačuje, že pozorované zmeny správania neboli sprevádzané zmenami v množstve receptorov. Tieto zistenia spoločne naznačujú, že endokrinné zmeny vyvolané samotnou expozíciou 3,5 GHz nemusia úplne vysvetliť predĺženie EL. Keďže ide o jednu z prvých štúdií skúmajúcich účinky expozície 3,5 GHz na parametre mužského libida, sú potrebné ďalšie štúdie na objasnenie neuroendokrinných mechanizmov spájajúcich hormonálne zmeny a sexuálne správanie.

Na rozdiel od skupiny s frekvenciou 3,5 GHz, vystavenie frekvencii 24 GHz viedlo k odlišnému vzorcu behaviorálnych a endokrinných zmien. Skupina s frekvenciou 24 GHz vykazovala štatisticky významné zníženie MF v porovnaní so skupinou s frekvenciou 3,5 GHz, zatiaľ čo PEI bol štatisticky významné predĺžený v porovnaní s kontrolnou skupinou. ML a IF sa medzi skupinami významne nelíšili. Relatívne veľká variabilita v rámci skupiny pozorovaná pre ML a IF pravdepodobne odráža inherentné biologické rozdiely v sexuálnom správaní medzi jednotlivými zvieratami. Hoci všetky potkany boli vybrané na základe porovnateľného veku, telesnej hmotnosti a zdravotného stavu a boli chované v rovnakých podmienkach ustajnenia a experimentu, individuálne behaviorálne reakcie zostávajú v štúdiách in vivo inherentne variabilné. Pre zlepšenie transparentnosti sú všetky pozorovania jednotlivých zvierat zobrazené ako prekryté dátové body na obrázkoch. Uvedené priemery skupín a štatistické analýzy boli vykonané po vyhodnotení odchyľujúcich sa hodnôt, ako je opísané v časti4,8.

Keďže MF odráža rastúcu aktivitu a bežne sa používa ako indikátor sexuálnej motivácie, nižšie MF pozorované v skupine s frekvenciou 24 GHz naznačuje zníženie správania súvisiaceho s libidom v porovnaní s potkanmi vystavenými frekvencii 3,5 GHz. Predĺžený PEI ďalej naznačuje pomalšie obdobie zotavenia po ejakulácii predtým, ako samec obnovil kopulačnú aktivitu. Preto behaviorálny profil skupiny s frekvenciou 24 GHz naznačuje možnú zmenu v správaní súvisiacom so sexuálnou motiváciou a zotavení po ejakulácii po expozícii mmvlnám. Tieto zistenia by sa však mali interpretovať opatrne kvôli variabilite, ktorá je vlastná behaviorálnym hodnoteniam, a exploratívnej povahe analýzy.

Hormonálne nálezy v skupine s frekvenciou 24 GHz sa tiež líšili od nálezov pozorovaných v Skupina s frekvenciou 3,5 GHz. Hladina testosterónu v skupine s frekvenciou 24 GHz bola štatisticky významne nižšia ako v skupine s frekvenciou 3,5 GHz, zatiaľ čo hladina estrogénu bola štatisticky významne znížená v porovnaní s kontrolnou skupinou. Následne bol pomer T/E v skupine s frekvenciou 24 GHz štatisticky významne nižší v porovnaní so skupinou s frekvenciou 3,5 GHz. To naznačuje, že vystavenie frekvencii 24 GHz nespôsobilo rovnaké zvýšenie testosterónu pozorované po vystavení frekvencii 3,5 GHz. Namiesto toho zníženie estrogénu a pomeru T/E naznačuje odlišný vzorec posunu v rovnováhe androgén-estrogén. Keďže testosterón aj estrogén sa podieľajú na regulácii mužského sexuálneho správania, tento zmenený hormonálny profil by sa mohol pripísať nižšiemu MF a predĺženému PEI pozorovanému v skupine s frekvenciou 24 GHz [23, 38]. Napriek tomu by sa táto interpretácia mala robiť s opatrnosťou, pretože táto štúdia hodnotila iba koncentrácie hormónov v krvnom obehu a nehodnotila steroidogénne enzýmy, aktivitu aromatázy ani iné regulačné mechanizmy zapojené do syntézy a metabolizmu hormónov.

Rozdielne behaviorálne a hormonálne reakcie pozorované medzi skupinami s frekvenciami 3,5 GHz a 24 GHz možno čiastočne vysvetliť rozdielnymi fyzikálnymi vlastnosťami týchto dvoch frekvencií [19]. Frekvencia 3,5 GHz patrí do mikrovlnného rozsahu a vykazuje väčšiu penetráciu tkaniva ako mmvlny. Naproti tomu 24 GHz patrí do rozsahu mmvĺn, kde je absorpcia energie povrchnejšia a prenikanie do hlbších tkanív je obmedzenejšie [3,20Tieto rozdiely v penetrácii a ukladaní energie môžu prispievať k frekvenčne závislým biologickým účinkom pozorovaným v tejto štúdii. Zatiaľ čo vystavenie frekvencii 3,5 GHz bolo spojené so zvýšenými hladinami testosterónu a predĺženou latenciou ejakulácie, vystavenie frekvencii 24 GHz bolo spojené so zníženou frekvenciou hlásenia, predĺženou...

postejakulačný interval, znížené hladiny estrogénu a nižší pomer T/E. Tieto zistenia spoločne naznačujú, že vystavenie mikrovlnnému a milimetrovému žiareniu môže byť spojené s rôznymi vzormi behaviorálnych a endokrinných reakcií. Napriek tomu sú potrebné ďalšie štúdie, aby sa zistilo, či tieto zmeny predstavujú konzistentné frekvenčne závislé biologické účinky.

Napriek týmto behaviorálnym a hormonálnym zmenám sa expresia AR proteínu v semenníkoch aj hypotalame v skupine s frekvenciou 24 GHz významne nezmenila. Podobné zistenia sa pozorovali aj v skupine s frekvenciou 3,5 GHz, čo naznačuje, že pozorované účinky neboli sprevádzané merateľnými zmenami v celkovom množstve AR proteínu. Jedným z možných vysvetlení je, že vystavenie RF-EMF za súčasných podmienok ovplyvňovalo hladiny cirkulujúcich hormónov rýchlejšie ako expresia receptorov, o ktorej je známe, že je vysoko tkanivovo a bunkovo špecifická [27,29Okrem toho, zmeny v dostupnosti hormónov môžu ovplyvniť reprodukčné správanie bez toho, aby nevyhnutne spôsobili detekovateľné zmeny v celkových hladinách AR proteínu vo vzorkách celého tkaniva. Keďže sa však hodnotila iba celková abundancia AR proteínu, nemožno vyvodiť žiadne závery týkajúce sa aktivácie receptorov, transkripčnej aktivity alebo androgénnej signalizácie v následných fázach.

Okrem toho sa v tejto štúdii nehodnotila aktivita aromatázy ani iné regulátory androgén-estrogénovej homeostázy, čo mohlo prispieť k hormonálnym zmenám pozorovaným po expozícii. Použitie pomeru párenia samcov a samíc 1:1 mohlo tiež obmedziť citlivosť pri detekcii jemných zmien v sexuálnej výkonnosti samcov. Budúce štúdie využívajúce vyšší pomer samíc a samcov a skúmajúce aktivitu aromatázy, reguláciu neurotransmiterov a signálne dráhy AR môžu poskytnúť ďalší pohľad na mechanizmy, ktoré sú základom pozorovaných frekvenčne závislých účinkov.

Vzhľadom na počet behaviorálnych, hormonálnych a s receptormi súvisiacich parametrov skúmaných v tejto štúdii, spolu s absenciou vopred špecifikovaného primárneho výsledku a korekcie pre viacnásobné porovnania, by sa zistenia mali interpretovať ako exploratívne a generujúce hypotézy. Štatisticky významné rozdiely pozorované vo vybraných parametroch by sa preto mali interpretovať s opatrnosťou a vyžadujú si ďalšiu validáciu v budúcich štúdiách s väčšími veľkosťami vzoriek a nezávislou replikáciou. Dôležité je, že väčšina hodnotených behaviorálnych, hormonálnych a s androgénnymi receptormi súvisiacich parametrov nevykazovala významné rozdiely medzi skupinami, čo naznačuje, že pozorované reakcie boli obmedzené skôr na špecifické výsledky ako na rozsiahle zmeny v mužskej reprodukčnej funkcii. Najmä behaviorálne zistenia týkajúce sa parametrov súvisiacich s latenciou by sa mali interpretovať opatrne, pretože tieto miery môžu byť ovplyvnené inherentnou individuálnou variabilitou, faktormi súvisiacimi s manipuláciou a absenciou zaslepeného hodnotenia.

4. Materiály a metódy

4.1. Zvieratá

Z oddelenia zdrojov laboratórnych zvierat (LARU) na Univerzite Kebangsaan v Malajzii (UKM) bolo získaných celkovo 36 potkanov kmeňa Sprague-Dawley, z ktorých bolo 18 samcov (n = 18) a 18 samíc (n = 18). Vzhľadom na absenciu špecifických usmernení týkajúcich sa veľkosti zvierat s RF-EMF bola veľkosť vzorky odôvodnená pomocou testovacej smernice OECD 407, ktorá odporúčala päť samcov a päť samíc.

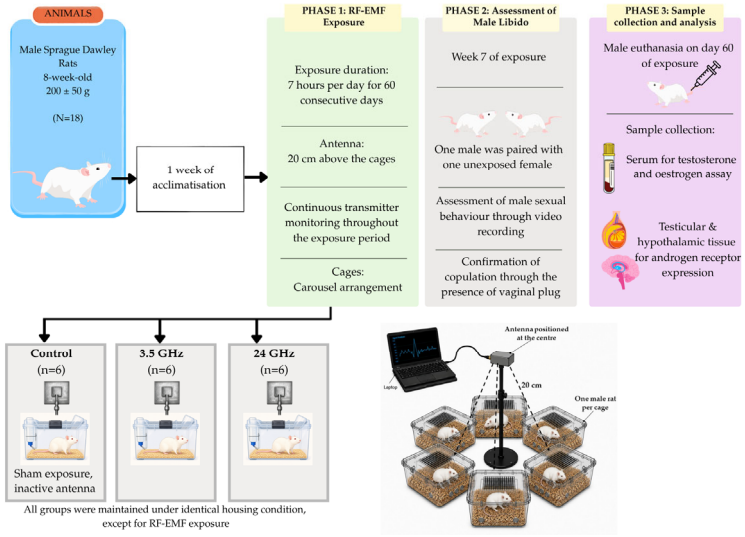
Zdravé samce potkanov, približne 8 týždňov staré a s hmotnosťou 200±V tejto štúdii bolo použitých 50 g, bez zjavných fyzických abnormalít alebo zranení. Expozícia sa začala, keď samce potkanov mali približne 8 týždňov, čo predstavuje reprodukčné štádium mladých dospelých jedincov, v ktorom sú reprodukčné orgány funkčne zrelé [38] a zároveň minimalizovať potenciálne mätúce účinky starnutia. Hoci sú spermie v nadsemenníku v tomto veku vo všeobecnosti prítomné [39], 60-dňové expozičné obdobie zahŕňalo jeden kompletný

spermatogénny cyklus, čím sa zabezpečilo, že spermie hodnotené na konci experimentu sa vyvinuli úplne za experimentálnych podmienok vystavenia RF-EMF.

Samce potkanov boli získané o mesiac skôr ako samice, aby sa umožnilo ich vystavenie príslušnej 5G frekvencii. Všetky zvieratá boli umiestnené v individuálne vetraných klietkach (IVC) a chované v Laboratóriu pre zvieratá, 8. poschodie, Predklinická budova, Lekárska fakulta, UKM. Potravné granule a čistá voda boli poskytované ad libitum v 12-hodinovom cykle svetlo-tma, pričom teplota okolia sa udržiavala na 22 °C.±5 °C.

Samce potkanov boli náhodne rozdelené do troch skupín po šiestich potkanoch (n = 6) v každej skupine. Prvou skupinou bola kontrolná skupina, ktorá bola simulovane vystavená žiareniu. Ďalšie dve skupiny boli 3,5 GHz a 24 GHz, ktoré boli vystavené žiareniu na svojich príslušných frekvenciách. Expozičný postup sa uskutočnil v radiačnej miestnosti, 9. poschodie v predklinickej budove Lekárskej fakulty UKM. Všetky skupiny boli vystavené expozičnému prostrediu 7 hodín denne počas 60 dní.

Telesná hmotnosť každého potkana bola zaznamenaná po príchode ako východisková hodnota a meraná týždenne počas celého expozičného obdobia, aby sa zabezpečilo, že nedošlo k žiadnym výrazným zmenám v celkovom zdraví a raste zvierat. Schematický prehľad štúdie je znázornený na obrázku.9.



Obrázok 9. Schematické znázornenie experimentálneho pracovného postupu. Samce potkanov kmeňa Sprague-Dawley boli aklimatizované počas jedného týždňa a potom zaradené do kontrolnej skupiny, skupiny s frekvenciou 3,5 GHz alebo skupiny s frekvenciou 24 GHz. Expozícia RF-EMF bola vykonávaná 7 hodín denne počas 60 dní. Sexuálne správanie samcov bolo hodnotené videozáznamom počas 7. týždňa, po ktorom nasledoval odber vzoriek na analýzu sérového testosterónu, estrogénu a androgénových receptorov v tkanive semenníkov a hypotalamu.

Všetky postupy zahŕňajúce zvieratá v tejto štúdii boli preskúmané a schválené Etickou komisiou pre zvieratá (UKMAEC) Univerzity Kebangsaan Malajzia v súlade s etickým schvaľovacím kódexom FP/2023/FARAH HANAN/24-MAY/1336-SEPT-2023-SEPT-2024.

4.2. Nastavenia expozície

V tejto štúdii bol model expozície navrhnutý tak, aby simuloval environmentálne podmienky 5G na základe prevádzkových frekvencií používaných vo verejných priestoroch [40,41]. Vybrané frekvencie 3,5 GHz (stredné pásmo) a 24 GHz (vysoké pásmo) predstavujú primárne spektrá pridelené pre 5G komunikáciu, najmä v Malajzii [39Obe frekvencie boli vybrané, aby sa umožnilo porovnávacie vyhodnotenie ich biologických účinkov, keďže žiadna predchádzajúca štúdia neskúmala ich vplyv na mužské libido.

V predchádzajúcej dozimetrickej analýze boli simulované hodnoty SAR normalizované na 1 W akceptovaného výkonu na anténnom napájaní. Numerické simulácie boli vykonané pri vzdialenostiach zdroja od modelu 5 a 10 cm a zodpovedajúce hodnoty SAR pri ex-

perimentálna vzdialenosť 20 cm bola odhadnutá pomocou lokálnej extrapolácie mocninového zákona [42]. Pri použití rovnakého systému expozície RF-EMF, konfigurácií antén, vzdialenosti medzi zdrojom a klietkou a usporiadania karuselovej klietky bola odhadovaná maximálna priemerná hodnota SAR 10 g a priemerná hodnota SAR pre celé telo pri expozičnej vzdialenosti 20 cm 0,15 a 0,06 W/kg pre expozíciu 3,5 GHz. Zodpovedajúce hodnoty pre expozíciu 24 GHz boli 4,00. $\times 10^{-7}$ a $1,80 \times 10^{-7}$ W/kg, v uvedenom poradí [42]. Tieto hodnoty boli odvodené z numerických simulácií a nemali by sa interpretovať ako priame merania SAR u voľne sa pohybujúcich zvierat. Odhadované hodnoty SAR uvedené v tomto dokumente sú preto použiteľné pre súčasnú experimentálnu konfiguráciu.

Počas experimentu bola kontrolná skupina tiež umiestnená v radiačnej miestnosti. Anténa alebo zariadenie použité na expozíciu však bolo nastavené na neaktívny režim. Na druhej strane, dve exponované skupiny boli vystavené aktívnej anténe alebo zariadeniu. Pre skupinu s frekvenciou 3,5 GHz bola expozícia vykonaná pomocou všesmerovej mikropáskovej antény vyvinutej Fakultou elektroniky a počítačového inžinierstva (FTKEK) Technickej univerzity v Malajzii v Melake (UTeM). Generátor signálu SynthHD bol nakonfigurovaný na výstupný výkon 22 dBm. Simulácia vzdialeného poľa CST priniesla maximálny realizovaný zisk antény 1,548 dBi pri 3,5 GHz. Táto frekvencia predstavuje spodnú hranicu spektra technológie 5G a pracuje v rozsahu mikrovlnného žiarenia.

Naproti tomu expozícia pre skupinu s frekvenciou 24 GHz využívala zariadenie s názvom 24 GHz Tuya WiFi Smart Human Presence Detector (Shenzhen, Čína), ktoré je vybavené anténou LD2420 24G mmWaves schopnou vysielať signál 24 GHz. Výrobca uvádza prevádzkový frekvenčný rozsah 24,00 – 24,25 GHz a maximálny ekvivalentný izotropicky vyžarovaný výkon (EIRP) 11 dBm pre modul HLK-LD2420 [43].

Nominálna hustota dopadajúceho výkonu v centrálnej referenčnej polohe 20 cm bola odhadnutá pomocou vzťahu medzi vzdialeným poľom a voľným priestorom opísaným v odporúčaní ITU-R BT.1698-1 [44]:

$$S_{\text{vrátane}}(r,\theta) = \frac{P_t G(\theta) 10^{-L_d/10}}{4\pi r^2}$$

kde P_t je výkon dodávaný vysielačom, $G(\theta)$ je zisk antény v smere expozičnej polohy, L_d je strata kábla a konektora v dB a r je vzdialenosť od fázového stredu antény k referenčnej polohe expozície. Ak je k dispozícii EIRP, zodpovedajúci vzťah je:

$$S_{\text{vrátane}} = \frac{\text{EIRP}}{4\pi r^2}$$

Pre 3,5 GHz:

$$P_{3,5} = 10^{(22-30)/10} = 0,15849 \text{ W}$$

$$G_{3,5} = 10^{1,548/10} = 1,428$$

$$S_{3,5} = \frac{0,15849 \times 1,428}{4\pi (0,20)^2} = 0,4503 \text{ W/m}^2$$

Táto hodnota zodpovedá 45,03μW/cm2

Pre 24 GHz:

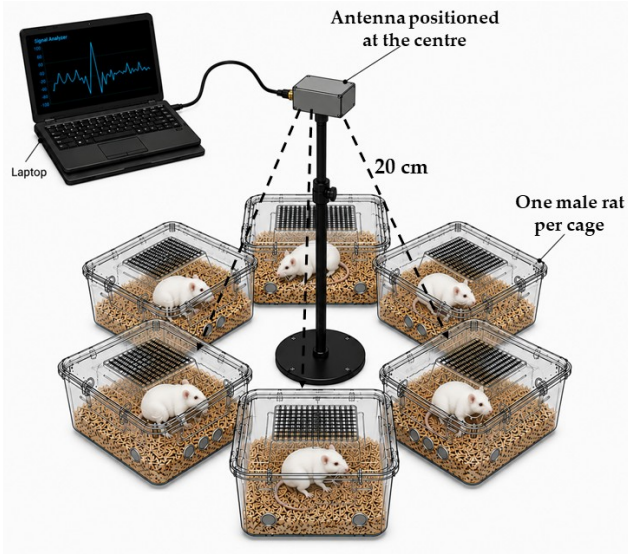
$$\text{EIRP}_{24} = 10^{(11-30)/10} = 0,012589 \text{ W}$$

$$S_{24} = \frac{0,012589}{4\pi (0,20)^2} = 0,02505 \text{ W/m}^2$$

Táto hodnota zodpovedá 2,505μW/cm2.

Anténa bola upevnená v strede karuselového usporiadania a umiestnená 20 cm nad klietkou (obrázok10) a expozícia sa vykonávala 7 hodín denne počas 60 po sebe nasledujúcich dní. Expozícia sa začala o 9:00 a skončila o 16:00. Toto trvanie expozície bolo zvolené tak, aby reprezentovalo predĺženú dennú expozíciu RF-EMF a zároveň zahŕňalo jeden kompletný spermatogénny cyklus u potkanov [39]. Expozičná vzdialenosť 20 cm bola zvolená na základe predchádzajúcich experimentálnych štúdií skúmajúcich biologické účinky

RF-EMF [45–47]. Táto vzdialenosť je navyše v súlade s medzinárodnými smernicami pre hodnotenie expozície vrátane smerníc stanovených Federálnou komunikačnou komisiou Spojených štátov (FCC) a Medzinárodnou komisiou pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP), ktoré bežne používajú vzdialenosť 20 cm na rozlíšenie medzi scenármi expozície v tesnej blízkosti a vzdialeného poľa/verejnosti [48,49Táto konfigurácia tiež odráža realistické podmienky vystavenia ľudí, kde sú zariadenia vyžarujúce bezdrôtové signály, ako sú smerovače, notebooky a pevné antény, zvyčajne umiestnené v blízkosti používateľov, a nie v priamom kontakte s ich telom.



Obrázok 10. Experimentálne nastavenie expozície RF-EMF. Šesť individuálne vetraných klietok (IVC), z ktorých každá obsahovala jedného samca potkana Sprague-Dawley, bolo symetricky usporiadaných v karuselu okolo centrálne umiestnenej antény. Anténa bola pripojená k notebooku na generovanie signálu RF-EMF a umiestnená 20 cm nad stredom karuselového usporiadania. Kontrolná skupina, ktorá bola vystavená simulovanému žiareniu, podstúpila rovnaké experimentálne nastavenie a manipulačné postupy, s výnimkou, že anténa zostala neaktívna.

Šesť individuálne vetraných klietok bolo symetricky usporiadaných v karuselu okolo centrálne umiestnenej antény. Zvieratá boli denne premiestňované z chovnej miestnosti do expozičnej miestnosti počas 7-hodinovej expozičnej seansy. Klietky zostali počas každej 7-hodinovej expozičnej seansy nehybné, zatiaľ čo zvieratá sa mohli voľne pohybovať vo svojich príslušných klietkach. Po každej expozičnej seanse boli zvieratá vrátené do chovnej miestnosti. V nasledujúcich dňoch expozície nebolo jednotlivé zvieratá pevne priradené ku konkrétnym pozíciám na karuselu, čo umožňovalo každému zvieraťu zaujať počas štúdie rôzne pozície, a tým sa znižovali systematické rozdiely v expozícii závislé od polohy. Kontrolná skupina vystavená hanbe podstúpila rovnaké postupy prepravy, usporiadania klietky a manipulácie, s výnimkou toho, že anténa zostala počas celej expozičnej doby neaktívna.

Pri expozícii 3,5 GHz bol RF prenos nepretržite monitorovaný v reálnom čase pomocou spektrálneho analyzátora USB-SA124B 12,4 GHz (Signal Hound, Battle Ground, WA, USA) so softvérom Spike (verzia 3.9.6) na overenie stability nosnej frekvencie a prevádzkyschopnosti zariadenia počas každej relácie. Pri expozícii 24 GHz bola nosná frekvencia overená pred a po každej relácii pomocou analyzátora signálu Keysight N9010A EXA (Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA), zatiaľ čo prevádzkový stav bol monitorovaný počas celej relácie pomocou sprievodnej aplikácie zariadenia.

Avšak intenzita dopadajúceho elektrického poľa a priestorová uniformita poľa v jednotlivých polohách klietky neboli priamo merané. Vypočítané hustoty dopadajúceho výkonu preto predstavujú nominálne analytické odhady voľného priestoru v centrálnej referenčnej vzdialenosti 20 cm.

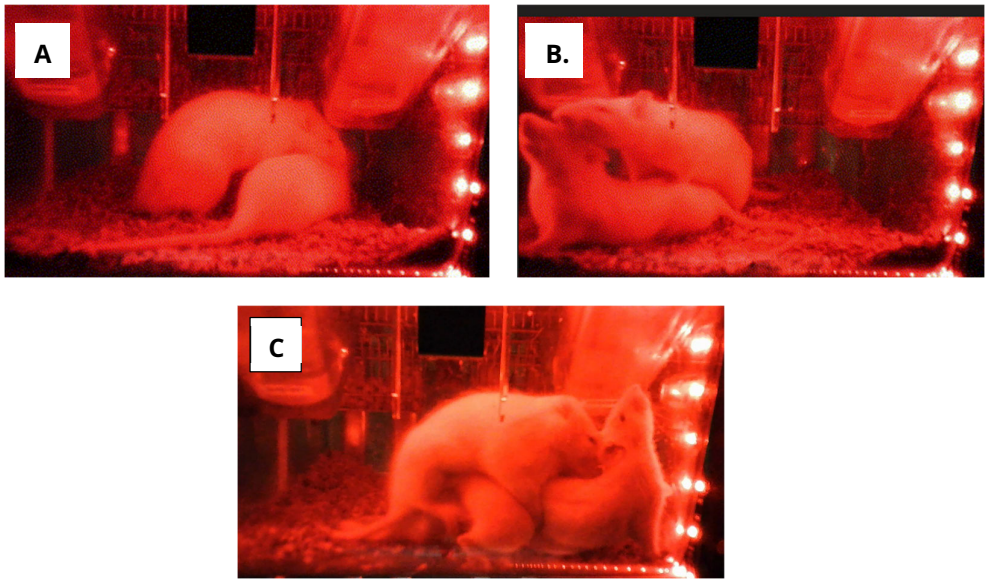
poloha, a nie priame merania v jednotlivých klietkach alebo u jednotlivých zvierat. Pre systém s frekvenciou 3,5 GHz bol odhad založený na nastavení generátora signálu a simulovanom maximálnom realizovanom zisku, zatiaľ čo pre systém s frekvenciou 24 GHz bol odvodený z maximálneho ekvivalentného izotropicky vyžarovaného výkonu (EIRP) špecifikovaného výrobcom. Tieto hodnoty by sa preto mali považovať za nominálne referenčné odhady pre experimentálne nastavenie a nemusia odrážať presnú expozíciu, ktorej boli jednotlivé zvieratá vystavené.

Všetky kovové držiaky na krmivo boli z klietky odstránené a nahradené plastovými nádobami, aby sa zabezpečilo optimálne vystavenie zvierat elektromagnetickému žiareniu zariadenia. Táto úprava bola nevyhnutná, pretože je známe, že kov ruší tým, že odpudzuje elektromagnetické vlny [50Teplota okolia v miestnosti sa tiež udržiavala na približne 22 °C.±5◦ C. Pred expozíciou bol na overenie prítomnosti a nosnej frekvencie vysielaného signálu v polohe klietky použitý analyzátor signálu EXA N9010A. Toto overenie nezahŕňalo priame meranie intenzity dopadajúceho elektrického poľa alebo hustoty výkonu.

4.3. Postup párenia a hodnotenie libida

Párenie sa uskutočnilo počas siedmeho týždňa expozície, pričom sa začalo jeden týždeň pred koncom expozičného obdobia. Po každej dennej expozícii RF-EMF boli samce potkanov vrátené do svojich klietok a do každej klietky bola v pomere 1:1 zavedená jedna pohlavne dospelá, neexponovaná samica, aby sa umožnilo prirodzené párenie, zatiaľ čo režim expozície samcov pokračoval počas celej štúdie.

Mužské sexuálne správanie bolo hodnotené manuálnym prezeraním videozáznamov vyškoleným vyšetrovateľom a nebol použitý žiadny automatizovaný softvér na rozpoznávanie správania. Momentálny vstup, intromisia, ejakulácia a interval po ejakulácii boli identifikované a hodnotené podľa vopred definovaných operačných kritérií opísaných nižšie. Zaslepenie nebolo počas hodnotenia vykonané z praktických a logistických obmedzení. Reprezentatívne statické snímky extrahované z videozáznamov sú uvedené na obrázku.11na ilustráciu behaviorálnych udalostí používaných počas manuálneho hodnotenia.



Obrázok 11. Reprezentatívny obrázok páriaceho správania u samcov potkanov. (**A**Montáž, (**B.**) intromisia a (**C**) ejakulácie boli identifikované manuálnym prehľadom kompletných videozáznamov na základe vopred definovaných behaviorálnych kritérií. Snímky boli zachytené pri slabom červenom osvetlení počas hodnotenia párenia.

Páriace správanie sa nepretržite zaznamenávalo od 17:00 do 4:00 za slabého osvetlenia pomocou mini digitálneho fotoaparátu (DV007, Shenzhen Yishili Dianzi).

Shangwu Co., Ltd., Shenzhen, Čína) namontované na každú IVC. Behaviorálne hodnotenia sa vykonali podľa zavedených protokolov opísaných Agmom (1997) [51], Yakubu a Akanji (2011) [52] a Zang a kol. (2016) [30Počas pozorovania boli zdokumentované nasledujúce indexy mužského sexuálneho správania:

1. Frekvencia nasadenia (MF): celkový počet pokusov o nasadenie, pri ktorých samec umiestnil svoje predné končatiny nad zadok samice bez dosiahnutia vaginálnej penetrácie.
2. Latencia párenia (ML): časový interval medzi prvým zavedením samice do prvého párenia.
3. Frekvencia intromisie (IF): počet úspešných vaginálnych penetrácií vykonaných mužom.
4. Latencia ejakulácie (EL): časový interval od prvého vstupu do ejakulácie.
5. Postejakulačný interval (PEI): trvanie od ejakulácie do ďalšej intromisie.

Aby sa počas hodnotenia sexuálneho správania samcov potkanov rozlíšilo nasadnutie, intromisia a ejakulácia, videozáznamy boli starostlivo preskúmané s cieľom identifikovať jednotlivé fázy správania. Nasadnutie bolo definované ako umiestnenie samca nad samicou bez zavedenia penisu [32] (Obrázok11A). Toto správanie sa zvyčajne opakovane vyskytovalo pred intromisiou alebo ejakuláciou a malo krátke trvanie. Intromisia bola identifikovaná, keď muž dosiahol zavedenie penisu do ženskej vagíny, sprevádzané hlbším panvovým tlakom trvajúcim približne 200 – 300 ms (obrázok)11B). Po intromisii samec zvyčajne vykonal niekoľko panvových pohybov a následne sa venoval starostlivosti o genitálie [32]. Ejakulácia bola identifikovaná po sérii úspešných intromisií a bola charakterizovaná hlbokým, predĺženým panvovým tlakom spojeným s uvoľnením spermií (obrázok11C). Po ejakulácii sa muž bežne venoval starostlivosti o seba a vstúpil do obdobia sexuálnej nečinnosti, ktoré sa označuje ako postejakulačný interval [32,53].

Okrem behaviorálneho hodnotenia bola každá samica potkana nasledujúce ráno manuálne vyšetrená na prítomnosť vaginálnej zátky, aby sa potvrdila úspešná kopulácia. Po zistení vaginálnej zátky bol proces párenia ukončený.

4.4. Eutanázia zvierat a odber vzoriek krvi

Po vykonaní všetkých párovacích postupov boli samce potkanov anestetizované jednorazovou intraperitoneálnou injekciou nadmernej dávky kokteilu ketamínu (3,34 mg/kg, Troy Laboratories Pty Ltd., Glendenning, Nový Južný Wales, Austrália), xylazínu (3,34 mg/kg, Troy Laboratories Pty Ltd., Glendenning, Nový Južný Wales, Austrália) a Zoletil-50 (1,66 mg/kg, Virbac, Milperra, Nový Južný Wales, Austrália) (KTX). Úmrtie zvierat bolo potvrdené stratou pravého reflexu, stratou reflexu štipnutia chvosta, stratou pedálneho reflexu predných a zadných končatín a absenciou rohovkového reflexu. Vzorky krvi boli odobraté bezprostredne po eutanázii pomocou techniky punkcie srdca. Krv bola odobratá do skúmaviek na odber krvi BD Vacutainer SST II Advance Plus (BD, Franklin Lakes, NJ, USA), ako opísali Jaffar a kol. (2022) [47].

Vzorky sa nechali zraziť pri izbovej teplote počas 30 minút a následne sa centrifugovali pri 12 000 otáčkach za minútu počas 10 minút pri 4 °C.◦C na oddelenie séra. Získané sérum bolo starostlivo rozdelené na alikvotné podiely a uskladnené pri −80◦C až do ďalšej analýzy s použitím enzýmovo-imunoanalýzy (ELISA) na kvantifikáciu hormónov.

4.5. Stanovenie koncentrácie testosterónu

Hladiny testosterónu v sére boli kvantifikované pomocou kompetitívnej ELISA súpravy (E-OSEL-R003; Elabscience Biotechnology Co., Ltd., Wuhan, Čína) podľa protokolu výrobcu. Stručne povedané, zložky testu vrátane premývacieho pufra, štandardov a konjugátu chrenovej peroxidázy (HRP) boli pripravené bezprostredne pred testovaním. Štandard

Krivka v rozsahu od 10 ng/ml do 0,16 ng/ml bola vytvorená sériovým riedením dodaného štandardu testosterónu.

Celkom 50µDo každej jamky 96-jamkovej mikroplatničky vopred potiahnutej protilátkou proti testosterónu sa duplicitne pridalo 50 µl vzorky séra a štandardu.µDo každej jamky sa pridal 1 l HRP konjugátu, platňa sa utesnila a inkubovala 60 minút pri 37 °C.◦C. Po inkubácii boli jamky odsáté a päťkrát premyté premývacím pufrom, aby sa odstránili nenaviazané materiály. Ďalej 90µL z 3′,5,5 Ďo každej jamky sa pridal roztok substrátu tetrametylbenzidínu (TMB) a nechal sa reagovať 15 minút pri teplote 37 °C.◦C v tme. Reakcia bola ukončená pridaním 50µStop roztok L. Optická hustota sa merala okamžite pri 450 nm pomocou čítačky mikroplatničiek (SpectraMax Plus 384, Molecular Devices, San Jose, CA, USA). Koncentrácie testosterónu sa vypočítali zo štandardnej krivky s korelačným koeficientom r = 0,996 pomocou MyAssay (Brighton, East Sussex, Spojené kráľovstvo).https://myassays.com/, prístup 15. júla 2026.

4.6. Stanovenie koncentrácie estrogénu

Koncentrácie estrogénu v sére boli stanovené pomocou kompetitívnej ELISA súpravy (E-EL-0152; Elabscience Biotechnology Co., Ltd., Wuhan, Čína) podľa pokynov výrobcu. Všetky činidlá vrátane premývacieho pufra, štandardov, biotínom značenej detekčnej protilátky a HRP konjugátu boli pred použitím čerstvo pripravené. Dodaný estrogénový štandard bol sériovo zriedený, aby sa vytvorila štandardná krivka v rozsahu od 100 pg/ml do 1,56 pg/ml.

Pre test, 50µDo jamiek 96-jamkovej mikroplatničky vopred potiahnutej protilátkou proti estrogénu sa duplicitne pridalo 50 l vzoriek séra alebo štandardov.µDo každej jamky sa pridal 1 µl detekčnej protilátky konjugovanej s biotínom a platňa sa inkubovala 45 minút pri 37 °C.◦C. Po inkubácii boli jamky odsáté a trikrát premyté premývacím pufrom na odstránenie nenaviazaných činidiel. Následne bolo 100µDo každej jamky sa pridal 1 pracovného roztoku HRP a následne sa inkubovalo 30 minút pri 37 °C.◦C. Jamky boli potom päťkrát premyté a 90µ Pridal sa 1 l TMB substrátu. Platňa sa inkubovala 15 minút pri 37 °C.◦C v tme, aby sa umožnilo vyvinutie farby.

Reakcia bola zastavená pomocou 50µStop roztok L a optická hustota bola okamžite meraná pri 450 nm pomocou čítačky mikroplatničiek (SpectraMax Plus 384, Molecular Devices, San Jose, CA, USA). Koncentrácie estrogénu boli vypočítané pomocou štandardnej krivky s korelačným koeficientom r = 0,994 a všetky hodnoty vzoriek boli stanovené pomocou MyAssay.

4.7. Hodnotenie androgénnych receptorov v semenníkoch a hypotalame

4.7.1. Extrakcia tkaniva semenníkov

Po eutanázii boli každému samcovi potkana starostlivo odobraté semenníky. Všetka zvyšková krv bola dôkladne odstránená pomocou predhriateho fosfátom pufrovaného fyziologického roztoku (PBS) (Oxoid Ltd, Basingstoke, Hampshire, Spojené kráľovstvo). Potom boli semenníky ponorené do tekutého dusíka a uskladnené pri teplote...−80◦C pre ďalšiu analýzu.

4.7.2. Extrakcia tkaniva hypotalamu

Lebka bola opatrne otvorená, aby sa odstránil celý mozog. Oblasť hypotalamu bola identifikovaná podľa atlasu Paxinosa a Watsona [54Mozog bol umiestnený ventrálnou stranou nahor a bol vypreparovaný 4 mm hrubý rez obsahujúci hypotalamus. Tkanivá boli okamžite zmrazené v tekutom dusíku a uskladnené pri teplote −80◦C.

4.7.3. Extrakcia a kvantifikácia proteínov

Tkanivá semenníkov a hypotalamu sa opláchli ľadovo studeným PBS, aby sa odstránila zvyšková krv. Na extrakciu testikulárnych proteínov sa 0,3 g testikulárneho tkaniva rozdrvilo na ľade a lyzovalo v 1 ml lyzačného pufra pre rádioimunoprecipitačný test (RIPA) (tkanivo:RIPA, 1:10) čerstvo doplneného o 10µl fenylmetylsulfonylfluoridu (PMSF) (100 mM) a ortovanadičnanu sodného (Na_3VO_4) (100 mM). Na extrakciu proteínov hypotalamu sa 0,03 g preparovaného hypotalamického tkaniva lyzovalo v 300µL RIPA lyzačný pufor (1:10) čerstvo doplnený o 3µl PMSF (100 mM) a Na_3VO_4 (100 mM). Tkanivá boli homogenizované metódou s ihlou a striekačkou na ľade, inkubované 30 minút na ľade s orbitálnym trepaním a potom centrifugované pri 12 000 ot./min., 4 °C (semenníky: 10 min; hypotalamus: 15 min). Supernatanty boli zozbierané ako lyzáty celkových proteínov, rozdelené do alikvotných podielov a uskladnené pri −80 °C. Následne bol obsah bielkovín vo vzorkách stanovený pomocou proteínového testu s kyselinou bicinchonínovou (BCA) (Thermo Scientific, Rockford, IL, USA) so štandardom bovinného sérového albumínu (BSA) (Thermo Scientific, Rockford, IL, USA) pripraveným pre štandardnú krivku. Korelačné koeficienty pre testikulárny proteín aj hypotalamický proteín sú r = 0,999 a 0,0997.

4.7.4. Elektroforéza na polyakrylamidovom géli s dodecylsulfátom sodným (SDS-PAGE)

Vzorky proteínov boli separované pomocou SDS-PAGE gélovej súpravy (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína) s 5 % stohovacím gélom a 10 % deliacim gélom. Pre každú vzorku bolo použitých 50µg celkového proteínu sa zmiešalo s 5×SDS nanášací pufor na dosiahnutie konečného objemu 10µL. Roztok sa potom denaturoval pri 90 °C počas 5 minút a krátko centrifugovaná pri 12 000 ot./min počas 30 sekúnd. Elektroforéza sa uskutočnila pri 80 V počas 10 minút pre stohovací gél a pri 150 V počas 45 minút pre deliaci gél. Proteín sa potom preniesol do 0,45µm polyvinylidéndifluoridové (PVDF) membrány (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína) s použitím systému mokrého prenosu. PVDF bol aktivovaný v metanole 1 minútu pred zostavením a prenos sa uskutočnil v prenosovom pufri obsahujúcom metanol s ľadovým blokom pri 40 V počas 2 hodín.

4.7.5. Imunodetekcia androgénnych receptorov

Membrána bola krátko premytá v TBST (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína), blokovaná v 3 % odstredenom mlieku v TBST počas 1 hodiny pri izbovej teplote. Potom bola membrána inkubovaná s polyklonálnou protilátkou proti androgénnemu receptoru (AR) (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína, 1:500) v 3 % odstredenom mlieku cez noc pri 4 °C. °C. Po trojnásobnom 15-minútovom premytí membrány pomocou TBST sa membrána inkubovala s kozou protilátkou proti králičej IgG (H+L), konjugovanou s HRP (1:2000) počas 1 hodiny pri izbovej teplote a premyla sa TBST (3×15 min). Pásy boli vizualizované pomocou súpravy substrátov Enhanced Chemiluminescence (ECL) (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína) a zobrazené pomocou chemiluminiscenčného zobrazovača.

4.7.6. Odstránenie izolácie a opätovné meranie sondážou pre kontrolu prevádzky

Po detekcii AR bola membrána premytá v TBST a inkubovaná so stripovacím pufrom počas 30 minút pri izbovej teplote. Potom bola membrána premytá pomocou TBST pred opätovným testovaním s protilátkou proti housekeeping proteínu na tej istej membráne s použitím primárnej protilátky, králičej polyklonálnej protilátky proti beta-aktínu (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína), cez noc. Potom bola membrána inkubovaná so sekundárnou protilátkou, myšou monoklonálnou protilátkou (AC-15) proti beta-aktínu (HRP) (Abcam, Cambridge, Spojené kráľovstvo), počas 1 hodiny pri izbovej teplote. Pásy boli vizualizované pomocou súpravy chemiluminiscenčného substrátu (ECL) (Elabscience Biotechnology Co., Ltd, Wuhan, Čína) a zobrazené pomocou chemiluminiscenčného...

cence imager. Optické hustoty proteínových pásov boli analyzované pomocou softvéru ImageJ (verzia 1.54g). Výsledky boli vyjadrené ako relatívna hodnota pomeru cieľového proteínu/β-aktínu.

4.8. Štatistická analýza

Všetky výsledky boli vyjadrené ako priemer±štandardná odchýlka (priemer±SD). Normalita distribúcie údajov bola hodnotená pomocou Shapiro-Wilkovho testu. Homogenita rozptylu bola hodnotená pomocou Leveneho testu. Odľahlé hodnoty boli skrínované pomocou procedúry SPSS boxplot a krížovo skontrolované pomocou Tukeyho kritéria interkvartilového rozpätia, kde hodnoty pod Q1 −1,5×IQR alebo vyšší Q3 + 1,5×IQR boli identifikované ako štatistické odchýlky. Pre normálne rozdelené údaje s rovnakými rozptylmi boli porovnania medzi kontrolnou skupinou, skupinou s frekvenciami 3,5 GHz a skupinou s frekvenciami 24 GHz vykonané pomocou jednofaktorovej analýzy rozptylu (ANOVA), po ktorej nasledoval Tukeyho post hoc test pre viacnásobné porovnania. Jednofaktorová ANOVA bola použitá na porovnanie významných rozdielov v libide, parametroch spermií a hormonálnych profiloch medzi skupinami. A *p*Hodnota < 0,05 sa považovala za štatisticky významnú. Veľkosti párových efektov sa vypočítali pomocou Hedgesovho testu korigovaného na skreslenie.*g*pre nezávislé skupiny. Štatistická analýza sa vykonala pomocou programu SPSS verzie 13.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

5. Závery

Záverom možno povedať, že chronické vystavenie sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam súvisiacim s frekvenciami 3,5 GHz a 24 GHz súvisiacim s 5G viedlo k výrazným zmenám v sexuálnom správaní mužov, sprevádzaným odlišnými hormonálnymi profilmi. Vystavenie sa frekvencii 3,5 GHz bolo spojené so zvýšenými hladinami testosterónu a predĺženou latenciou ejakulácie. Na druhej strane, vystavenie sa frekvencii 24 GHz bolo spojené so zníženou aktivitou ejakulácie, predĺženou obnovou po ejakulácii, zníženými hladinami estrogénu a nižším pomerom T/E. Tieto zistenia naznačujú, že rôzne frekvencie 5G môžu ovplyvňovať reprodukčnú funkciu mužov prostredníctvom odlišných biologických dráh, a nie vyvolávať jednotnú odpoveď. Hoci sa vystavenie mmvlnam s frekvenciou 24 GHz vo všeobecnosti vyznačuje povrchovou absorpciou energie a obmedzeným prenikaním do tkaniva, súčasné zistenia ukazujú, že merateľné zmeny správania a endokrinného systému sa môžu vyskytnúť aj po chronickom vystavení sa za skúmaných podmienok. Hoci tieto výsledky nepreukazujú kauzalitu ani nenaznačujú nepriaznivé reprodukčné výsledky u ľudí, zdôrazňujú potrebu ďalšieho skúmania biologických účinkov mmVĺn, najmä preto, že ich používanie v bezdrôtových komunikačných technológiách sa neustále rozširuje.

Súčasné zistenia však predstavujú prieskumný výskum, najmä vzhľadom na zavedenie novších frekvencií RF-EMF pracujúcich na rôznych vlnových dĺžkach a ich potenciálne biologické interakcie. Pozorované zmeny by sa preto mali interpretovať opatrne a považovať za predbežné pozorovania, ktoré môžu poskytnúť základ pre budúce štúdie skúmajúce vplyv nových technológií RF-EMF na reprodukčné správanie mužov a ich základné fyziologické mechanizmy. Predtým, ako bude možné vyvodiť definitívne závery týkajúce sa potenciálnych účinkov vystavenia RF-EMF na sexuálne správanie a reprodukčnú funkciu mužov, bude potrebný ďalší výskum zahŕňajúci rôzne parametre expozície, väčšie veľkosti vzoriek, ďalšie mechanistické koncové body a spresnené experimentálne prístupy.

Príspevky autorov:Štúdiu navrhli AH, FHFJ, SFI a MHM. ZZ a AAMB prispeli k návrhu expozičného nastavenia a poskytli anténu použitú v štúdii. AH, AFZ, MFMR, NJ, SMAST a SV vykonali zber údajov, interpretovali a analyzovali údaje. AH vypracoval rukopis, zatiaľ čo FHFJ, SFI a KO ho revidovali a dohliadali na celú prácu. Všetci autori si prečítali a súhlasili s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie:Túto štúdiu podporil Fundamentálny grant Lekárskej fakulty (GFFP), Lekárskej fakulty UKM, pod číslom grantu FF-2023-176. Túto prácu podporil aj

Schéma grantov pre základný výskum (FRGS), číslo grantu FRGS/1/2022/SKK06/UKM/03/2, financovaná Ministerstvom vysokoškolského vzdelávania (MOHE), Malajzia.

Vyhlásenie inštitucionálnej revíznej komisie:Všetky postupy zahŕňajúce zvieratá vykonané v tejto štúdii boli preskúmané a schválené Etickou komisiou pre zvieratá UKM (UKMAEC) so schvaľovacím číslom: FP/2023/FARAH HANAN/24-MAY/1336-SEPT-2023-SEPT-2024; dátum schválenia: 24. mája 2023.

Vyhlásenie o informovanom súhlase: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov:Všetky pôvodné príspevky uvedené v tejto štúdii sú zahrnuté v článku. Ďalšie otázky môžete adresovať príslušným autorom.

Poďakovanie: Chceme vyjadriť našu vďaku všetkým laboratórnym pracovníkom, ktorí sa podieľali na chove zvierat a poskytovali technickú pomoc počas molekulárnej štúdie.

Konflikty záujmov: Amyrul Azuan Mohd Bahar je zamestnancom spoločnosti Intel Microelectronics (M) Sdn. Bhd. Jeho príspevok k tejto štúdii sa obmedzoval na poskytovanie technického poradenstva a odporúčanie vhodného expozičného zariadenia s frekvenciou 24 GHz použitého v experimentoch. Nebol zapojený do návrhu experimentu, získavania údajov, analýzy údajov, interpretácie zistení, prípravy rukopisu ani do rozhodnutia o publikovaní. Ostatní autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov.

Skratky

V tomto rukopise sa používajú nasledujúce skratky:

5G	Piata generácia
Rozšírená realita	Androgénny receptor
BCA	Kyselina bicinchonínová
BSA	Hovädzí sérový albumín
Očakávané úverové straty (ECL)	Zvýšená chemiluminiscenčná
EL	latencia ejakulácie
ELISA	Enzýmovo-imunosorbentný test
Federálna komisia pre komunikáciu (FCC)	Federálna komunikačná komisia
GHz	Gigahertz
HRP	Chrenová peroxidáza
ICNIRP	Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením
AK	Intromisná frekvencia
KTX	Ketamín-xylazín
MHz	Megahertz
mmVlny	Milimetrové vlny
MF	Frekvencia montáže
Strojové učenie	Latencia pripojenia
PBS	Fosfátom pufrovaný fyziologický
PEI	roztok Interval po ejakulácii
PMSF	Fenylmetylsulfonylfluorid
PVDF	Polyvinylidéndifluorid
RF-EMF	Rádiofrekvenčné elektromagnetické
RIPA	pole Rádioimunoprecipitačný test
SDS-PAGE	Elektroforéza na polyakrylamidovom géli s dodecylsulfátom sodným, Tris-
TBST	pufrovaný fyziologický roztok s Tween-20
TMB	3′,5,5‘-tetrametylbenzidín
Wi-Fi	Bezdrôtová vernosť

Referencie

1. Chu, KY; Khodamoradi, K.; Blachman-Braun, R.; Dullea, A.; Bidhan, J.; Campbell, K.; Zizzo, J.; Israeli, J.; Kim, M.; Petrella, F.; a kol. Vplyv rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia vyžarovaného modernými mobilnými telefónmi na pohyblivosť a životaschopnosť spermií: Štúdia in vitro.*Eur. Urol. Focus***2023**,*9*, 69–74. [CrossRef] [ ]PubMed]
2. Tokpınar, A.; Altuntaş, E.; Değermenci, M.; Yılmaz, H.; Bas, O. Vplyv elektromagnetických polí na ľudské zdravie: Prehľad. *Stredné Čierne more J. Health Sci.***2024**,*10*, 229–238. [CrossRef]
3. Karipidis, K.; Mate, R.; Urban, D.; Tinker, R.; Wood, A. Mobilné siete 5G a zdravie – prehľad súčasného stavu vedy o výskume nízkofrekvenčných polí nad 6 GHz.*J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.***2021**,*31*, 585–605. [CrossRef] [ ]PubMed]
4. Negi, P.; Singh, R. Súvislosť medzi reprodukčným zdravím a vystavením neionizujúcemu žiareniu.*Elektromagnetická biológia a medicína***2021**, *40*, 92–102. [CrossRef] [ ]PubMed]
5. Pall, ML Wi-Fi predstavuje významnú hrozbu pre ľudské zdravie.*Environmentálny výskum.***2018**,*164*, 405–416. [CrossRef] [ ]PubMed]
6. Kesari, KK; Agarwal, A.; Henkel, R. Žiarenie a mužská plodnosť.*Reprodukčná biológia. Endokrinológia.***2018**,*16*, 118. [CrossRef] [ ]PubMed]
7. Yadav, H.; Rai, U.; Singh, R. Rádiofrekvenčné žiarenie: Možná hrozba pre mužskú plodnosť.*Reprodukčný toxikol.***2021**,*100*, 90–100. [CrossRef] [ ]PubMed]
8. Mahmoudi, R.; Mortazavi, SMJ; Safari, S.; Nikseresht, M.; Mozdarani, H.; Jafari, M.; Zamani, A.; Haghani, M.; Davari, M.; Tabatabaie, A.; a kol. Účinky mikrovlnného elektromagnetického žiarenia emitovaného bežnými smerovačmi Wi-Fi na počet a pohyblivosť potkaních spermií.*Medzinárodný časopis pre radiáciu.***2015**,*13*, 363–368. [CrossRef]
9. De Iuliis, GN; Newey, RJ; King, BV; Aitken, RJ Žiarenie z mobilných telefónov indukuje in vitro produkciu reaktívnych foriem kyslíka a poškodenie DNA v ľudských spermiách.*PLoS ONE***2009**,*4*, e6446, Oprava v*PLoS ONE***2013**,*8*.https://doi.org/10.1 371/annotation/9a8a0172-3850-4059-b852-72c330769c1b. [ ]CrossRef] [ ]PubMed]
10. Zahmatkesh, P.; Mohammadi, A.; Mashhadi, R.; Khatami, F.; Mirzaei, A.; Zareian Baghdadabad, L.; Khalili, F.; Gholami, K.; Rahimnia, R.; Noori, N.; a kol. Vplyv rádiofrekvenčných elektromagnetických vĺn na index fragmentácie DNA a expresiu génov súvisiacich so spermatogenézou u potkanov.*Int. J. Med. Toxicol. Forensic Med.***2024**,*14*, E45951. [CrossRef]
11. Ziegelmann, M.; Tadros, N. Mužská neplodnosť. Dostupné online:https://www.auanet.org/meetings-and-education/for-medicalstudents/medical-students-curriculum/male-infertility(prístup 1. decembra 2024).
12. Gautam, R.; Priyadarshini, E.; Nirala, JP; Rajamani, P. Vplyv neionizujúceho elektromagnetického žiarenia na mužskú neplodnosť: Posúdenie mechanizmu a dôsledkov.*Medzinárodný časopis Radiat. Biol.***2022**,*98*, 1063–1073. [PubMed]
13. Cordelli, E.; Ardoino, L.; Benassi, B.; Consales, C.; Eleuteri, P.; Marino, C.; Sciortino, M.; Villani, P.; Brinkworth, MH; Chen, G.; a kol. Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF) na výsledky tehotenstva a pôrodu: Systematický prehľad experimentálnych štúdií na neľudských cicavcoch.*Medzinárodné životné prostredie***2023**,*180*, 108178. Oprava v*Medzinárodné životné prostredie***2025**,*196*, 109273. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109273. [ ]CrossRef] [ ]PubMed]
14. Dasdag, S.; Taş, M.; Akdag, MZ; Yegin, K. Vplyv dlhodobého vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 2,4 GHz vyžarovanému zo zariadení Wi-Fi na funkcie semenníkov.*Elektromagnetická biológia a medicína***2015**,*34*, 37–42. [CrossRef] [ ]PubMed]
15. Vijay, S.; Ibrahim, SF; Osman, K.; Zulkefli, AF; Ros, MFM; Jamaludin, N.; Taha, SMAS; Hairulazam, A.; Jaffar, FHF histomorfometria a kvalita spermií u samcov potkanov vystavených 2,45 GHz Wi-Fi.*Reprodukcia***2025**,*169*, e250048. [CrossRef] [ ]PubMed]
16. Foroughimehr, N.; Wood, A.; McKenzie, R.; Karipidis, K.; Yavari, A. Návrh a implementácia špecializovaného systému ožiarenia milimetrovými vlnami na skúmanie radiačných účinkov 5G a budúcich technológií.*Senzory***2024**,*24*, 1516. [CrossRef] [ ]PubMed]
17. Dangi, R.; Lalwani, P.; Choudhary, G.; You, I.; Pau, G. Štúdia a výskum technológie 5G: Systematický prehľad.*Senzory* **2022**,*22*, 26.
18. Tummala, M.; Bekal, P.; Kumar, P.; Puri, S.; Rawat, S.; Kumari, A. Systematický prehľad súčasných a budúcich perspektív 5G komunikácií.*Cogent Eng.***2025**,*12*, 2547635. [CrossRef]
19. Pall, ML Milimetrové (MM) vlnové a mikrovlnné frekvenčné žiarenie vyvoláva hlboko prenikajúce účinky: Biológia a fyzika.*Rev. Environment. Zdravie***2022**,*37*, 247–258. [PubMed]
20. Adekola, SA; Amusa, KA; Biowei, G. Vplyv 5G mmvlnného žiarenia na ľudské tkanivo s použitím kože, rohovky (oko) a skloviny (zub) ako študijných kandidátov.*J. Eng. Aplikované vedy.***2025**,*72*, 51. [CrossRef]
21. Wood, A.; Mate, R.; Karipidis, K. Metaanalýza štúdií in vitro a in vivo biologických účinkov nízkoúrovňových milimetrových vĺn.*J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.***2021**,*31*, 606–613. [CrossRef] [ ]PubMed]
22. Pfaus, JG Fyziológia libida. In*Rakovina a sexuálne zdravie*; Mulhall, JP, Incrocci, L., Goldstein, I., Rosen, R., Eds.; Humana Press: Totowa, NJ, USA, 2011; s. 25–33.
23. Pedrenho Neto, R.; dos Santos Sobreira Nunes, R.; Nascimento, BCG; Machado Barbosa Neto, C.; de Bessa Junior, J.; Srougi, M.; Carlos Nahas, W. Korelácia medzi libidom a testosterónom: Pomer estradiolu u mužov so sexuálnou dysfunkciou.*J. Sex. Med.* **2022**,*19*, S232. [CrossRef]

24. Nguyen, V.; Leonard, A.; Hsieh, TC Testosterón a sexuálna túžba: Prehľad dôkazov.*Androgény***2022**,*3*, 85–90. [CrossRef]

25. Schulster, M.; Bernie, AM; Ramasamy, R. Úloha estradiolu v mužskej reprodukčnej funkcii.*Ázijčan J. Androl.***2016**,*18 rokov*, 435–440. [CrossRef] [ ]PubMed]
26. Chen, T.; Wu, F.; Wang, X.; Ma, G.; Xuan, X.; Tang, R.; Ding, S.; Lu, J. Rôzne hladiny estradiolu korelujú so sexuálnou dysfunkciou u dospelých mužov.*Vedecký zástupca.***2020**,*10*, 12660. [CrossRef] [ ]PubMed]
27. Juntti, SA; Tollkuhn, J.; Wu, MV; Fraser, EJ; Soderborg, T.; Tan, S.; Honda, SI; Harada, N.; Shah, NM Androgénny receptor riadi vykonávanie, ale nie programovanie, mužského sexuálneho a teritoriálneho správania.*Neurón***2010**,*66*, 260–272. [CrossRef] [ ]PubMed]
28. Hasbi, H.; Gustina, S. Regulácia androgénov v spermatogenéze na zvýšenie mužskej plodnosti.*Indones. Bull. Anim. Vet. Sci.***2018**,*28*, 13. [CrossRef]

29. O'Hara, L.; Smith, LB Úloha androgénnych receptorov v spermatogenéze a neplodnosti.*Najlepšia prax. Výskum klinickej endokrinológie. Metab.***2015**, *29*, 595–605. [CrossRef] [ ]PubMed]
30. Zang, Z.-J.; Ji, S.-Y.; Huang, S.-Z.; Jiang, M.-H.; Fang, Y.-Q. Vplyv žiarenia z mobilných telefónov na sexuálne správanie a sérovú koncentráciu testosterónu a LH u samcov myší.*Okupácia. Dis. Životné prostredie. Lekárske***2016**,*4*, 56–62. [CrossRef]
31. Správa o výkonnosti malajzijského odvetvia komunikácií a multimédií za rok 2024. Dostupné online:https://www.scribd.com/document/981019252/MCMC-IPR-2024-V-031125(prístup 6. mája 2026).
32. Hull, EM; Rodríguez-Manzo, G. Mužské sexuálne správanie. V*Hormóny, mozog a správanie*, 2. vyd.; Elsevier Academic Press: San Diego, CA, USA, 2009; Zväzok 1, s. 5–65.
33. Nimbi, FM; Tripodi, F.; Rossi, R.; Navarro-Cremades, F.; Simonelli, C. Mužská sexuálna túžba: Prehľad biologických, psychologických, sexuálnych, vzťahových a kultúrnych faktorov ovplyvňujúcich túžbu.*Sex. Med. Rev.***2020**,*8*, 59–91. [CrossRef] [ ]PubMed]
34. Pfaus, JG Cesty sexuálnej túžby.*J. Sex. Med.***2009**,*6*, 1506 – 1533. [CrossRef] [ ]PubMed]
35. Granata, AR; Pugni, V.; Rochira, V.; Zirilli, L.; Carani, C.*Hormonálna regulácia mužského pohlavia: Úloha testosterónu, estrogénu, prolaktínu, oxytocínu, vazopresínu a ďalších*; Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA, 2012.
36. Vijay, S.; Ibrahim, SF; Osman, K.; Zulkefli, AF; Mat Ros, MF; Jamaludin, N.; Taha, SMAS; Hairulazam, A.; Jaffar, FHF Vplyv rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia s frekvenciou 2,45 GHz na zložky hypotalamo-hypofyzárno-gonádovej osi u samcov potkanov.*Medzinárodný časopis mol. vedy.***2026**,*27*, 4582. [CrossRef] [ ]PubMed]
37. Castelló-Porcar, AM; Martínez-Jabaloyas, JM Pomer testosterónu/estradiolu, je užitočný pri diagnostike erektilnej dysfunkcie a nízkej sexuálnej túžby?*Starnúci muž***2016**,*19*, 254–258. [CrossRef] [ ]PubMed]
38. Lazarov, GV Pomer estradiolu k testosterónu a erektilná dysfunkcia u mužov vo veku 35 – 45 rokov.*Folia Med.***2025**,*67*, e143525. [CrossRef] [ ] PubMed]
39. Picut, CA; Remick, AK; de Rijk, EPCT; Simons, ML; Stump, DG; Parker, GA Postnatálny vývoj semenníkov u potkanov: Morfologická štúdia a korelácia morfológie s neuroendokrinnými parametrami.*Toxicol. Pathol.***2015**,*43*, 326–342. [CrossRef] [ ]PubMed]

40. Malajzijská komisia pre komunikácie a multimédiá.*Záverečná správa o pridelení frekvenčného spektra pre mobilné širokopásmové služby v Malajzii*; Malajzijská komisia pre komunikáciu a multimédiá: Cyberjaya, Malajzia, 2019.
41. Medzinárodná komisia pre biologické účinky elektromagnetických polí. Vedecké dôkazy vyvracajú zdravotné predpoklady, ktoré sú základom limitov expozície rádiofrekvenčnému žiareniu FCC a ICNIRP: Dôsledky pre 5G.*Životné prostredie. Zdravie***2022**,*21*, 92. [PubMed]
42. Syed Taha, SMA; Jaffar, FHF; Hairulazam, A.; Vijay, S.; Jamaludin, N.; Zulkefli, AF; Mat Ros, MF; Osman, K.; Zakaria, Z.; Mohd Bahar, MAA; a kol. Expresia proteínov tepelného šoku v semenníkoch u potkanov po vystavení RF-EMF s frekvenciou 3,5 GHz a 24 GHz. *Medzinárodný časopis mol. vedy.***2026**,*27*, 3452. [CrossRef] [ ]PubMed]
43. Spoločnosť Shenzhen Hi-Link Electronic Co., Ltd.*Používateľská príručka HLK-LD2420*, verzia 1.0; Shenzhen Hi-Link Electronic Co., Ltd.: Shenzhen, Čína, 2023.
44. *Odporúčanie ITU-R BT.1698-1*; Hodnotenie elektromagnetických polí z pozemských vysielacích systémov na posúdenie vystavenia ľudí neionizujúcim emisiám. ITU: Ženeva, Švajčiarsko, 2023.
45. Shokri, S.; Soltani, A.; Kazemi, M.; Sardari, D.; Mofrad, FB Účinky vystavenia sa Wi-Fi (2,45 GHz) na apoptózu, parametre spermií a testikulárnu histomorfometriu u potkanov: Štúdia časového priebehu.*Bunka J.***2015**,*17*, 322–331. [CrossRef] [ ]PubMed]
46. Oh, JJ; Byun, SS; Lee, SE; Choe, G.; Hong, SK Vplyv elektromagnetických vĺn z mobilných telefónov na spermatogenézu v ére 4G-LTE. *Medzinárodný biomedicínsky výskum***2018**,*2018*, 1801798. [CrossRef] [ ]PubMed]
47. Jaffar, FHF; Osman, K.; Hui, CK; Zulkefli, AF; Ibrahim, SF Dlhodobé vystavenie Wi-Fi od predpubertálneho veku do dospelosti na proliferáciu spermatogónií a ochranné účinky doplnku stravy s príchuťou vtáčieho hniezda.*Predná strana. Fyziol.***2022**,*13*, 828578. [CrossRef] [ ]PubMed]

48. Federálna komunikačná komisia.*Vystavenie ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam a prehodnotenie limitov a politík FCC pre vystavenie rádiofrekvenčným poliam*Federálna komisia pre komunikácie: Washington, DC, USA, 2020; Zväzok 85, s. 18131–18151.

49. Ziegelberger, G.; Croft, R.; Feychting, M.; Green, AC; Hirata, A.; d'Inzeo, G.; Jokela, K.; Loughran, S.; Marino, C.; Miller, S.; a kol. Pokyny ICNIRP pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz).*Zdravotná fyzika*.**2020**,*118*, 483–524. [CrossRef] [ ]PubMed]
50. Hwang, U.; Kim, J.; Seol, M.; Lee, B.; Park, IK; Suhr, J.; Nam, J. Kvantitatívna interpretácia účinnosti tienenia elektromagnetického rušenia: Je to skutočne absorbér vĺn alebo reflektor?*ACS Omega***2022**,*7*, 4135–4139. [CrossRef] [ ]PubMed]
51. Agmo, A.*Fyziológia reprodukcie*; Raven Press: New York, NY, USA, 1997; 1. zväzok.
52. Yakubu, MT; Akanji, MA Vplyv vodného extraktu z kmeňa Massularia Acuminata na sexuálne správanie samcov potkanov Wistar. *Alternatívne lieky založené na dôkazoch pre komplement.***2011**,*2011*, 738103. [CrossRef] [ ]PubMed]
53. Mhaouty-Kodja, S.; Naulé, L.; Capela, D. Sexuálne správanie: od hormonálnej regulácie k endokrinným poruchám.*Neuroendokrinológia* **2019**,*107*, 400–416. [CrossRef] [ ]PubMed]
54. Paxinos, G.; Watson, C. Mozog potkana v stereotaxických súradniciach. Dostupné online:https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3066944(prístup 5. januára 2026).

Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa: Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.