Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Ekotoxikológia a environmentálna bezpečnosť 322 (2026) 120336

Zoznamy obsahu sú k dispozícii naScienceDirect

Ekotoxikológia a environmentálna bezpečnosť

domovská stránka časopisu:www.elsevier.com/locate/ecoenv

# Reakcia na vyhlásenie BfS: Vedecké objasnenia týkajúce sa poškodenia chromozómov a vystavenia RF-EMF

Vážený redaktor,

Po zverejnenníGulati a kol. (2024)v odbore ekotoxikológia a environmentálna bezpečnosť sme dostali pripomienky a žiadosti o údaje od výskumníkov z celého sveta.

Sme vďační za tieto komentáre a úvahy, ktoré sú nevyhnutné pre vedecký pokrok. Nemecký Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zverejnil vyhlásenie, v ktorom tvrdí, že naša štúdia „nemôže poskytnúť spoľahlivú odpoveď" týkajúcu sa potenciálnych zdravotných účinkov vystavenia sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF).https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221–2024 091946461/3/SL_Gulati_2024_HodnotenieOxidatívneho_Eng.pdf). Preto sa k jeho kľúčovým tvrdeniam vyjadrujeme z vedeckého hľadiska.

Berieme na vedomie, že naša štúdia mala prieskumný charakter, zahŕňala obmedzený počet účastníkov a sama o sebe nemôže preukázať kauzalitu medzi dlhodobým vystavením RF-EMF a biologickými účinkami. Niekoľko aspektov interpretácie BfS si však vyžaduje vedecké objasnenie.

## 1. Relevantné sú tepelné aj netepelné biologické účinky

Súčasné smernice pre expozíciu rádiofrekvenčným a elektromagnetickým poliam sú založené predovšetkým na preukázaných akútnych tepelných účinkoch a sú navrhnuté tak, aby zabránili nadmernému zahrievaniu tkanív (ICNIRP, 2020). V experimentálnych systémoch však boli opakovane hlásené biologicky relevantné netermálne reakcie. Hoci súčasné dôkazy stále nie sú dostatočné na stanovenie odhadov kauzálneho rizika alebo na revíziu limitov expozície, tieto pozorovania si vyžadujú pokračujúce skúmanie možných netermálnych biologických účinkov za presne definovaných podmienok expozície.

Dlhodobé štúdie na hlodavcoch (NTP, 2018a,b; Falcioni a kol., 2018) hlásili netermálne karcinogénne výsledky. ICNIRP dospela k záveru, že tieto údaje nie sú dostatočné na revíziu expozičných prahov (ICNIRP, 2018), ale napriek tomu vykazujú biologicky relevantné netepelné reakcie. Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC, 2013) poznamenáva, že látky spôsobujúce karcinogenitu u zvierat s dostatočnou úrovňou dôkazov sú biologicky pravdepodobnými ľudskými karcinogénmi.

Nedávna syntéza dôkazov odWeller a kol. (2025)tiež identifikovali heterogénne, ale biologicky relevantné zistenia súvisiace s expozíciou RF-EMF a genotoxicitou v in vitro, in vivo a epidemiologických štúdie.

## 2. Biologická dozimetria

Bezpečnostné normy Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu (MAAE) nie sú založené na absorbovanej energii alebo tepelnom zaťažení, ale na biologických ukazovateľoch – konkrétne na poškodení DNA a tvorbe chromozómových aberácií (MAAE, 2018). Naša štúdia pozorovala rovnaké typy aberácií v skupine s vysokou expozíciou (Gulati a kol., 2024), čo naznačuje biologickú odpoveď v súlade s princípmi biodozimetrie.

Hlavným zistením štúdie bola zvýšená frekvencia niekoľkých koncových bodov chromozómových aberácií v skupine s vyššou expozíciou. Štatisticky významné rozdiely boli pozorované u dicentrických chromozómov, chromozómových fragmentov, chromatidových medzier a celkových chromozómových aberácií. Dôležité je, že tieto zistenia zostali významné aj po konzervatívnej korekcii pre viacnásobné testovanie.

Analýza chromozomálnych aberácií v našej štúdii bola vykonaná zaslepene s použitím zavedenej cytogenetickej metodológie bežne používanej v biologickej dozimetrii podľa medzinárodne uznávanej praxe (MAAE, 2018). Použili sa duplicitné kultúry a snímanie obrazu pomocou Metaferu podporilo štandardizáciu pracovného postupu a konzistentnosť hodnotenia.

Dôležité je, že samotné hodnotenie chromozómových aberácií vykonávali manuálne skúsení pracovníci za zaslepených podmienok. V súčasnosti je známe, že plne automatizované metódy hodnotenia aberácií majú obmedzenú citlivosť a spoľahlivosť pri nízkofrekvenčných chromozómových aberáciách, najmä pri dicentrických chromozómoch a chromozómových fragmentoch. Preto zostáva expertné manuálne hodnotenie štandardným prístupom v mnohých aplikáciách biologickej dozimetrie.

Podľa nášho názoru si štatisticky významné zistenia v takýchto biologicky stanovených cytogenetických koncových bodoch vyžadujú dôkladné vedecké zváženie a ďalšie skúmanie.

## 3. Nekonzistentnosť v údajoch o poškodení DNA

BfS tvrdí, že existuje nezrovnalosť medzi chromozómovými aberáciami

https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2026.120336
Prijaté 12. decembra 2025; Prijaté v revidovanej podobe 22. mája 2026; Schválené 3. júna 2026
Dostupné online od 6. júna 2026
0147-6513/© 2026 Autori. Vydané spoločnosťou Elsevier Inc. Toto je článok s otvoreným prístupom pod licenciou CC BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Tabuľka 1**
Shapiro-Wilkovo hodnotenie normality hlavných cytogenetických koncových bodov.

| Koncový bod | Shapiro–Wilk p. (Kontrola) | Shapiro–Wilk p. (Odhalené) |
|---|---|---|
| Mikronukleárny test | 0,774 | 0,691 |
| % Dicentrické chromozómy % | 0,338 | 0,269 |
| Kruhové chromozómy | 0,216 | 0,187 |
| % acentrických chromozómov | 0,487 | 0,103 |
| % chromatidových medzier | 0,882 | 0,151 |
| % Fragmenty | 0,821 | 0,098 |
| % celkového počtu chromozómov aberácie | 0,638 | 0,536 |

(CA) a mikronukley (MN). Hoci oba markery môžu korelovať, ich zhoda sa neočakáva za všetkých experimentálnych podmienok (Savage, 1988; Jones a kol., 1994). V našich údajoch sa CA významne zvýšila v skupine s vysokou expozíciou, zatiaľ čo MN sa medzi skupinami nelíšila.

Selvan a kol. (2014)ukázali, že oneskorenia medzi odberom krvi a mitogénnou stimuláciou (>7 h) znižujú výťažok MN v dôsledku straty buniek v interfáze. Tento faktor je priamo relevantný, pretože v našej štúdii bolo stimulačné oneskorenie podobne dlhé.

Ďalej sme analyzovali frekvencie MN v podobných súboroch kontrolných neexponovaných vzoriek z dvoch nezávislých súborov údajov a zistili sme veľký rozdiel: 0,4‰ (Kochanová a kol., 2023) oproti 2,3‰ (Gulati a kol., 2024). Metódy a personál boli identické.

Hlavný procedurálny rozdiel bol čas transportu: vzorky v súbore údajov s vyššou MN boli transportované približne 7 hodín, zatiaľ čo v inej štúdii transport trval <1 hod.

Predĺžený transport pravdepodobne zmenil bunkový metabolizmus a dynamiku mitotického vretienka, čím zvýšil tvorbu MN v pozadí a potenciálne maskoval menšie rozdiely súvisiace s expozíciou.

#### 4. Netermálne účinky sú skutočné, ale nie sú dobre pochopené

Ak vedecké dôkazy zostávajú neúplné, možno zvážiť preventívne prístupy.

Princíp ALARA („As Low as Reasonably Achievable“) poskytuje takýto rámec, ktorý vyžaduje minimalizáciu expozície pri zohľadnení technických a spoločenských faktorov (Európska sieť ALARA,www.eu-alara.net). Realizuje sa skrátením času expozície, zvýšením vzdialenosti a použitím tienenia.

Vyhlásenie BfS kladie väčší dôraz na obmedzenia a neistotu štúdie, zatiaľ čo iné publikované dôkazy vrátane prehľadu od Weller a kol. (2025), naznačuje, že biologicky relevantné genotoxické zistenia si naďalej vyžadujú vedecký výskum.

Podľa nášho názoru dostupné dôkazy podporujú pokračovanie v opatrnom vyšetrovaní.

### 5. Dôležitá nie je len intenzita, ale aj dávka

Dávka je súčinom intenzity expozície a času. Zatiaľ čo krátkodobá expozícia s nízkou intenzitou nemusí vykazovať žiadne merateľné účinky, dlhodobá expozícia zvyšuje kumulatívnu dávku, a tým aj potenciál pre detekovateľné biologické reakcie.

Gulati a kol. (2024)naznačujú, že dlhodobá expozícia môže prispieť k zvýšenej kumulatívnej biologickej záťaži.

Túto hypotézu, podporovanú predtým publikovanými zisteniami (Beljajev, 2017), by sa mali testovať vo väčších kohortách za jasne definovaných expozičných podmienok.

### 6. Dokumentácia expozície

Náš prístup k meraniu je porovnateľný s technickými normami Medzinárodnej elektrotechnickej komisie (IEC), hoci IEC neposkytuje špecifické protokoly pre priestory na spanie. Smernice Združenia nemeckých stavebných biológov (VDB) zahŕňajú takéto postupy a zahŕňajú medzinárodne uznávané metódy, ako je 3D hodnotenie elektrického a magnetického poľa, sondy bezpotenciálového elektrického poľa a analýza RF spektra.

Naše hodnotenie expozície sa riadilo recenzovanými a zavedenými smernicami VDB pre merania v teréne v oblasti životného prostredia (VDB, 2018). Elektrické a magnetické polia v domovoch účastníkov sme vyhodnotili pomocou štandardizovaných postupov vyvinutých pre stavebno-biologické výskumy ( www.baubiologie.net).

Keďže nočný spánok predstavuje najdlhší nepretržitý expozičný interval v pokojových podmienkach, zamerali sme naše merania na toto obdobie (VDB, 2018).

Dôležité je, že študijné skupiny preukázali jasné oddelenie nameraných úrovní expozície GSM a LTE v spálňach bez prekrývania medzi skupinami.

### 7. Štatistika

Najprv sme vyhodnotili distribúciu údajov pomocou Shapiro-Wilkovho testu normality. Shapiro-Wilkov test nepreukázal významné odchýlky od približnej normálnej distribúcie pre hlavné koncové body chromozómových aberácií v žiadnej zo študijných skupín (Tabuľka 1). Výsledok hodnotenia normality preto podporil použitie parametrických analýz, ako je uvedené v Gulati a kol. (2024).

Okrem toho sme údaje znovu analyzovali pomocou neparametrických Mann-Whitneyových U (MWU) testov podľa odporúčaní BfS (Tabuľka 2). Neparametrické analýzy priniesli rovnaké celkové závery a podporili robustnosť hlavných zistení o chromozómových aberáciách.

Dôležité je, že hlavné koncové body chromozómových aberácií zostali štatisticky významné v parametrických aj neparametrických analýzach.

Tieto dodatočné analýzy podporujú robustnosť hlásených cytogenetických zistení.

### 8. Závery

Záverom, naša štúdia (Gulati a kol., 2024) poskytuje štatisticky spoľahlivé dôkazy konzistentné so súvislosťou medzi dlhodobým vystavením RF-EMF a zvýšenými chromozómovými aberáciami za skúmaných podmienok.

Keďže štúdia je exploratívna a založená na obmedzenej veľkosti vzorky, zistenia by sa mali interpretovať opatrne a mali by sa nezávisle replikovať vo väčších, dobre charakterizovaných kohortách a longitudinálnych štúdiách.

### Vyhlásenie o autorskom príspevku CrediT

**Igor Beljajev:**Písanie – kontrola a úprava, Písanie – pôvodný koncept, Supervízia, Administrácia projektu, Metodika, Konceptualizácia.

**Tabuľka 2**

Na vyhodnotenie robustnosti pozorovaní sa vykonalo štatistické porovnanie biologických koncových bodov medzi kontrolnou skupinou a oxidačným stresom, analýzy prechodného poškodenia DNA a trvalého poškodenia chromozómov. Hlavný chromozóm koncové body aberácie zostal štatisticky významný v oboch analýzach, podpora robustnosti cytogenetické nálezy. Údaje sú k dispozícii ed ako priemerný±štandardná odchýlka (SD) a korešponduje zisťovanie minimálnych a maximálnych hodnôt ns = nevýznamné. p<*0,05; *** p<0,01.

| Porovnanie<br>Parameter | | parametrická ANOVA | | | | neparametrická MWU | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Kontrolná skupina (N = 12) | Exponovaní (N = 12) | P | Význam | Ovládanie (N = 12) | | Odhalené (N = 12) | | P | Význam |
| | | Priemerný ±ŠPZ | Priemerný ±ŠPZ | | | Minimálna | Max | Minimálna | Max | | |
| Oxidácia | Test lipidovej peroxidácie | 8,87 ±2,33 | 13,84 ±2,78 | 0,184 | ns | 2,56 | 29,49 | 1,92 | 30,77 | 0,133 | ns |
| Prechodné poškodenie DNA | FPG Comet assay (chvostový moment t, µm) | 30.11 ±2,77 | 33,39 ±1,81 | 0,332 | ns | 18.10 | 49,65 | 23.30 | 43,10 | 0,236 | ns. |
| | Alk. Test kométy (moment chvosta,µm) | 9.07 ±1,20 | 13,45 ±1,67 | 0,045 | * | 4,42 | 17.35 | 4,73 | 24,45 | 0,069 | ns |
| | γH2AX | 0,87 ±0,07 | 0,79 ±0,07 | 0,445 | ns | 0,46 | 1,36 | 0,62 | 1,48 | 0,204 | ns |
| | 53BP1 | 1,36 ±0,08 | 1,23 ±0,08 | 0,247 | ns | 0,86 | 1,77 | 0,90 | 1,75 | 0,273 | ns |
| | γH2AX/53BP1 | 0,74 ±0,07 | 0,65 ±0,06 | 0,328 | ns | 0,38 | 1,25 | 0,46 | 1,16 | 0,184 | ns |
| | Mikronukleový test (%) | 2,35 ±0,13 | 2,34 ±0,11 | 0,928 | ns | 1,82 | 3.15 | 1,77 | 3,06 | 0,977 | ns |
| Trvalé poškodenie DNA neopraviteľné | **% Dicentrických chromozómov** | **0,41 ±0,06** | **0,69 ±0,07** | **0,007** | *** | **0,09** | **0,90** | **0,36** | **1.12** | **0,006** | *** |
| | % kruhových chromozómov | 0,09 ±0,03 | 0,14 ±0,04 | 0,375 | ns | 0,00 | 0,27 | 0,00 | 0,41 | 0,529 | ns |
| | % Acentrický chromozóm mesiace | 0,89 ±0,15 | 1,32 ±0,20 | 0,100 | ns | 0,27 | 1,94 | 0,35 | 2,74 | 0,133 | ns |
| | **% chromatidových medzier** | **1,16 ±0,15** | **2.32 ±0,44** | **0,019** | * | **0,18** | **1,91** | **0,36** | **6.10** | **0,015** | * |
| | **% Fragmenty** | **1,35 ±0,17** | **2,62 ±0,26** | **<0,001** | *** | **0,55** | **2,46** | **1,66** | **4,65** | **0,001** | *** |
| | **% celkových chromozomálnych aberácií** | **3,90 ±0,31** | **7,09 ±0,39** | **<0,001** | *** | **2,29** | **6.16** | **5.24** | **9,90** | **<0,001** | *** |

**Wilhelm Mosgoeller:**Písanie – kontrola a úprava, Písanie – pôvodný koncept, Supervízia, Administrácia projektu, Metodika, Získavanie finančných prostriedkov, Konceptualizácia.**Dietrich Moldan:**Vyšetrovanie.**Sachin Gulati:** Písanie – pôvodný koncept, vizualizácia, skúmanie.

#### Vyhlásenie o konkurenčných záujmoch

Autori vyhlasujú, že nemajú žiadne známe konkurenčné finančné záujmy ani osobné vzťahy, ktoré by mohli ovplyvniť prácu uvedenú v tomto článku.

#### Dostupnosť údajov

Údaje budú sprístupnené na požiadanie.

## Referencie


Beljajev, I., 2017. „Trvanie expozície a dávka pri hodnotení netermálnych biologických Účinky mikrovĺn. In: Markov, M. (ed.), Dozimetria v bioelektromagnetike. CRC Press, Boca Raton, Londýn. New York, s. 171–184.

Falcioni, L., Bua, L., Tibaldi, E., et al., 2018. Správa o konečných výsledkoch týkajúcich sa mozgu a nádory srdca u potkanov kmeňa Sprague-Dawley vystavených od prenatálneho života až do prirodzenej smrti rádiofrekvenčnému poľu mobilného telefónu, ktoré predstavuje environmentálne vyžarovanie základňovej stanice GSM s frekvenciou 1,8 GHz. Environ. Res. 165, 496–503.https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.037.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29530389〉Gulati, S., Mosgoeller, W., Moldan, D. a kol., 2024. Hodnotenie oxidačného stresu a genetická nestabilita u obyvateľov v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov v Nemecku. Ecotoxicol. Environ. Saf. 279, 116486.https://doi.org/10.1016/j.ekoenv.2024.116486.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38820877〉MAAE (2018). „Radiácia pre verejnosť a životné prostredie“, bezpečnosť MAAE séria noriem č. SSG-8 Viedeň, MAAE - Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu〈https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf〉IARC (2013). „Neionizujúce žiarenie, časť II: Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia“, vyd.: Pracovná skupina pre hodnotenie karcinogénnych rizík pre ľudí č. Lyon, Francúzsko IARC Press. Dostupné na:https://publications.iarc.fr/126.

ICNIRP, 2018. Poznámka ICNIRP k nedávnym štúdiám karcinogenézy.〈https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPnote2018.pdf〉.

ICNIRP, 2020. Pokyny pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz) (Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením). Health Phys. 118, 483–524.https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32167495〉(Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením).

Jones, LA, Clegg, S., Bush, C., McMillan, TJ, Peacock, JH, 1994. Vzťah medzi... medzi chromozómovými aberáciami, mikronukleami a bunkovými usmrteniami v dvoch ľudských nádorových bunkových líniách s veľmi odlišnou rádiosenzitivitou. Int. J. Radiat. Biol. 66, 639–642. https://doi.org/10.1080/09553009414551751.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/ 7983459〉.

Kochanova, D., Gulati, S., Durdik, M. a kol., 2023. Účinky nízkych dávok ionizujúceho žiarenia o genomickej nestabilite u pracovníkov intervenčnej rádiológie. Sci. Rep. 13, 15525. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42139-5.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37726322〉.

NTP, 2018b. Technická správa o toxikologických a karcinogenéznych štúdiách v B6C3F1/N myši vystavené celotelovému rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou (1900 MHz) a moduláciami (GSM a CDMA) používanými mobilnými telefónmi“. Oddelenie Národného toxikologického programu, Národný inštitút environmentálnych zdravotných vied, Národný toxikologický program č. Research Triangle Park, Severná Karolína, USA.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK564537/〉.

NTP (2018a). „Technická správa NTP o toxikologických a karcinogenéznych štúdiách v Sprague Dawley (Hsd: Sprague Dawley®ŠPZ®)Potkany vystavené celotelovému rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou (900 MHz) a moduláciami (GSM a CDMA) používanými mobilnými telefónmi“, Národný toxikologický program č. Technická správa 595, Research Triangle Park, NC 27709, Národný inštitút environmentálnych zdravotných vied, Služba verejného zdravotníctva, Ministerstvo zdravotníctva a sociálnych služieb USA.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK561730/〉.

Savage, JR, 1988. Komentár ku kvantitatívnemu vzťahu medzi mikronukleami a chromozómové aberácie. Mutat. Res. 207, 33–36.https://doi.org/10.1016/0165-7992(88)90008-5.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3336377〉

. Selvan, GT, Bhavani, M., Vijayalakshmi, J., Paul Solomon, FD, Chaudhury, NK, Venkatachalam, P., 2014. Oneskorená mitogénna stimulácia znižuje poškodenie DNA hodnotené mikronukleovým testom v ľudských periférnych krvných lymfocytoch po ožiarení (60)co. Dose Response 12, 498–508.https://doi.org/10.2203/dose-response.13- 060.Selvan.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25249838〉.

VDB, 2018. „Zur Vorgehensweise bei baubiologischen Untersuchungen in Gebäuden, Teil A – Physikalische Untersuchungen". VDB-Richtlin. Berufsverb. Dtsch. Baubiologen e. V.

Weller, SG, McCredden, JE, Leach, V., Chu, C., Lam, AK, 2025. Preskúmanie rozsahu a mapa dôkazov o expozícii rádiofrekvenčnému poľu a genotoxicite: hodnotenie údajov in vivo, in vitro a epidemiologických údajov. Front. Public. Health 13, 1613353.https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1613353.〈https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4 0809778〉.



Igor Beljajev*

*Centrum biomedicínskeho výskumu, Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko*

Sachin Gulati

*Centrum biomedicínskeho výskumu, Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko*

Wilhelm Mosgoeller

*Lekárska univerzita vo Viedni, Inštitút pre výskum rakoviny, Viedeň, Rakúsko*

Dietrich Moldan

*Dr. Moldan Umweltanalytik, Iphofen 97346, Nemecko*

* Zodpovedajúci autor.

*E-mailová adresa:*igor.beliaev@savba.sk (I. Beljajev).