Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Správy z biochémie a biofyziky 47 (2026) 102705

Zoznamy obsahu sú k dispozícii naScienceDirect

Správy z biochémie a biofyziky

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

# Neionizujúce žiarenie a rakovina: Prehľad súčasných dôkazov, mechanistických poznatkov a dôsledkov pre verejné zdravie

Mridula Agrahari[a,1], Šruti Gupta[a,1]Gaurav Thákur[a], Shweta Tanwarová[b]Rohit Gautam[a]
Taruna Arora[a,*]

[a]*Oddelenie reprodukčného, detského zdravia a výživy, ústredie Indickej rady pre lekársky výskum, Nové Dillí, India*
[b]*Ústredie Indickej rady pre lekársky výskum, Nové Dillí, India*

INFORMÁCIE O ČLÁNKU

*Kľúčové slová:*
Neionizujúce žiarenie
Rakovina
Rádiofrekvenčné elektromagnetické pole Vysielacie antény

ABSTRAKT

Neionizujúce žiarenie (NIR) generované z vysokovýkonných prenosových vedení, vysielacích antén a mobilných telefónov predstavuje jednu z rozsiahlych environmentálnych expozícií, ktoré môžu vyvolať karcinogénne následky. Hoci NIR nemá dostatok energie na uvoľnenie elektrónov pre ionizáciu, bol navrhnutý nepriamy mechanizmus, ktorý sa podieľa na nepriaznivých následkoch za určitých expozičných podmienok. V dôsledku toho zostáva vystavenie rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF) trvalým vedeckým a verejne zdravotným problémom, pokiaľ ide o jeho možnú úlohu v prejavoch rakoviny. Cieľom tejto štúdie je analyzovať zistenia o expozícii RF-EMF a karcinogenite integráciou epidemiologických štúdií a experimentálnych zistení s cieľom preukázať jeho potenciálnu funkciu v prejavoch rakoviny. Dostupné dôkazy nie sú dostatočné na to, aby sa dospelo k záveru, že vystavenie RF-EMF je priamo pôsobiaci genotoxický karcinogén alebo iniciátor rakoviny. Laboratórne štúdie však ukázali, že dlhodobé vystavenie netepelnému RF-EMF môže spôsobiť oxidačný stres, genomickú nestabilitu, epigenetické zmeny, narušenie transportu iónov a dysreguláciu bunkových signálnych dráh. Tieto biologické účinky môžu prispievať k podpore a progresívnym štádiám karcinogenézy, ale nie sú priamo zodpovedné za vznik nádoru/rakoviny. Epidemiologické dôkazy sa výrazne líšia medzi extrémne nízkofrekvenčnými magnetickými poľami (ELF-MF) a rádiofrekvenčnými elektromagnetickými poľami (RF-EMF). Hoci vystavenie ELF-MF preukázalo spoľahlivejšiu súvislosť s detskou leukémiou, údaje spájajúce vystavenie RF-EMF s rakovinou sú menej konzistentné. Na silné potvrdenie jeho účasti na rozvoji rakoviny sú potrebné štúdie s väčšou vzorkou a predĺženým trvaním expozície.

## 1. Úvod

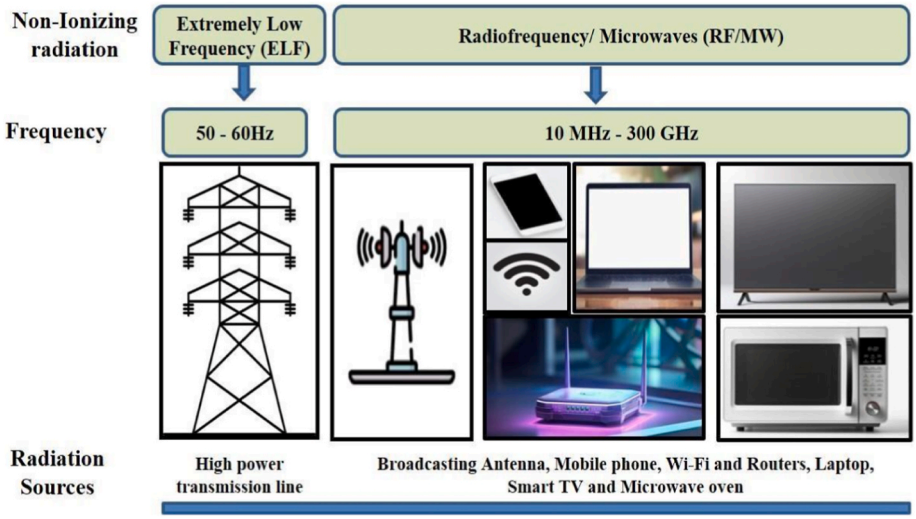
Neionizujúce žiarenie zahŕňa širokú škálu elektromagnetických polí (EMF) vrátane rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF), extrémne nízkofrekvenčných polí (ELF), mikrovĺn, ultrafialového žiarenia, viditeľného svetla a infračerveného žiarenia [1,2Ľudia a zvieratá sú neustále vystavení rádiofrekvenčnému a elektromagnetickému žiareniu (RF-EMF). Hoci neionizujúce žiarenie nemá dostatok energie na uvoľnenie elektrónov potrebných na ionizáciu, jeho vystavenie môže pri rôznych podmienkach expozície vyvolať nepriamu biologickú reakciu. Vystavenie neionizujúcemu žiareniu (NIR) vedie k oxidačnému stresu, zmenenej génovej expresii a interferencii v dráhach opravy DNA, čo vedie k genomickej nestabilite a poškodeniu bunkových procesov [3]. Mechanizmus a potenciálne riziko nepriaznivých účinkov na zdravie v dôsledku neionizujúceho žiarenia preto zostali vedeckou záležitosťou.

vyšetrovanie pre prebiehajúci výskum. Dôležité je, že biologické účinky hlásené po expozícii RF-EMF by sa mali odlišovať od priamej karcinogénnej iniciácie. Na rozdiel od ionizujúceho žiarenia nemá RF-EMF dostatočnú energiu na priame poškodenie. Súčasné mechanistické hypotézy sa preto vo veľkej miere zameriavajú na negenotoxické dráhy, ktoré by mohli prispievať k podpore a progresii nádoru prostredníctvom oxidačného stresu, zmenených signálnych dráh, epigenetických zmien a narušenej bunkovej homeostázy.

Epidemiologický výskum u ľudí zameraný na vystavenie sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF) najmä z telekomunikácií, pracovísk a environmentálnych zdrojov vyvolal rozsiahle obavy týkajúce sa ich potenciálnych negatívnych účinkov na zdravie [4–6Okrem toho, vystavenie sa mobilným telefónom, rádiovým staniciam, telefónnym vežiam, vedeniam vysokého napätia, vysielacím anténam a radarovým zariadeniam je spojené s voľnými radikálmi.

* Zodpovedajúci autor. Oddelenie reprodukčného zdravia a výživy detí, Indická rada pre lekársky výskum, Nové Dillí, India. *E-mailová adresa:* tarunakatyal@gmail.com (T. Arora).
[1]Rovnaký príspevok.

https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2026.102705
Prijaté 23. marca 2026; Prijaté v revidovanej podobe 19. júna 2026; Schválené 3. júla 2026
Dostupné online 7. júla 2026
2405-5808/© 2026 Vydané spoločnosťou Elsevier BV Toto je článok s otvoreným prístupom pod licenciou CC BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).




**Obr. 1.**Schematické znázornenie zdrojov neionizujúceho žiarenia.

vývoj rakoviny vyvolanej poškodením [3]. S rýchlym globálnym nárastom používania mobilných telefónov sa objavili obavy týkajúce sa karcinogénnych účinkov RF-EMF a ELF-MF vysielaných z mobilných telefónov a iných zdrojov [ 5,7V metaanalýze 23 prípadovo-kontrolných štúdií sa uvádza, že používanie mobilných telefónov je spojené so zvýšeným rizikom nádoru a dlhodobé používanie mobilného telefónu 10 a viac rokov zvyšuje riziko nádorov mozgu [8]. Na rozdiel od vyššie uvedených zistení, niekoľko epidemiologických štúdií vrátane prípadových kontrolných štúdií a rôznych prípadových kontrolných metaanalýz uvádza protichodné dôkazy o riziku vzniku nádoru pri používaní mobilných telefónov [8–11].

Na základe epidemiologických štúdií na ľuďoch a zvieratách Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) a Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) vyhodnotili, že rádiofrekvenčné elektromagnetické pole (RF-EMF) vysielané mobilnými telefónmi by malo byť klasifikované ako karcinogénne pre ľudí (skupina 2B) [1,12].

Výskumníci však tvrdili, že dostupné dôkazy si vyžadujú prehodnotenie klasifikácie IARC.[13Napriek tomu IARC naďalej klasifikuje RF-EMF ako skupinu 2B (možno karcinogénne pre ľudí) a k preklasifikácii do skupiny 1 nedošlo. S pokrokom v nových technológiách síce používanie mobilných telefónov spôsobilo revolúciu v spôsobe komunikácie a spustilo hospodársky rast, ale zároveň vyvolalo nepriaznivé biologické účinky na živé organizmy, čo dokazuje nedostatok riadneho usmernenia o súvisiacich rizikách vystavenia. Preto je na vyvodenie záverov o karcinogénnych účinkoch neionizujúceho žiarenia potrebný komplexný prehľad existujúcej literatúry. V tomto prehľade sumarizujeme dostupnú literatúru a zistenia týkajúce sa vystavenia neionizujúcemu žiareniu a jeho karcinogénnych účinkov na ľudí a zvieratá, čo bude prospešné pre vytvorenie verejných usmernení týkajúcich sa jeho vystavenia a limitov.

## 2. Metodika

Tento článok je naratívnym prehľadom a neriadi sa formálnou metodológiou systematického prehľadu. Literatúra bola vyhľadávaná pomocou databáz PubMed, Scopus a Google Scholar do marca 2026. Hľadali sme originálne výskumné práce, systematické prehľady a metaanalýzy v anglickom jazyku. Štúdie boli vybrané podľa ich relevantnosti pre biologické účinky, mechanistické dôkazy a možné karcinogénne následky vystavenia neionizujúcemu žiareniu.

## 3. Zdroje rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF)

Neionizujúce žiarenie (NIR) sa šíri rýchlosťou svetla a je vyžarované širokou škálou prírodných a umelo vytvorených zdrojov. vystavenie tomuto blízkemu infračervenému žiareniu spôsobuje značné zdravotné riziká pre obyvateľstvo [14]. Tieto zdroje sú v súčasnom prostredí rozšírené a hojne rozšírené. Prírodné zdroje pozostávajú z ultrafialového žiarenia (UV), infračerveného a viditeľného žiarenia zo slnečného žiarenia a zemského magnetického poľa. Medzi umelé zdroje patria mobilné telefóny a vysielače, zariadenia Wi-Fi, vysokovýkonné prenosové vedenia, rádiový prenos s amplitúdovou moduláciou (AM), rádiový prenos s frekvenčnou moduláciou (FM), mikrovlnné rúry, domáce rozvody, monitory notebookov a počítačov, televízory, vysielacie antény, LED diódy (žiarovky), žiarivky, ručné lasery a laserové ukazovátka atď.15]. Z nich boli stručne rozobraté niektoré zdroje, ktoré ukazujú pravdepodobný karcinogénny potenciál rádiofrekvenčného žiarenia (Obr. 1).

### *3.1. Vysokovýkonné prenosové vedenia*

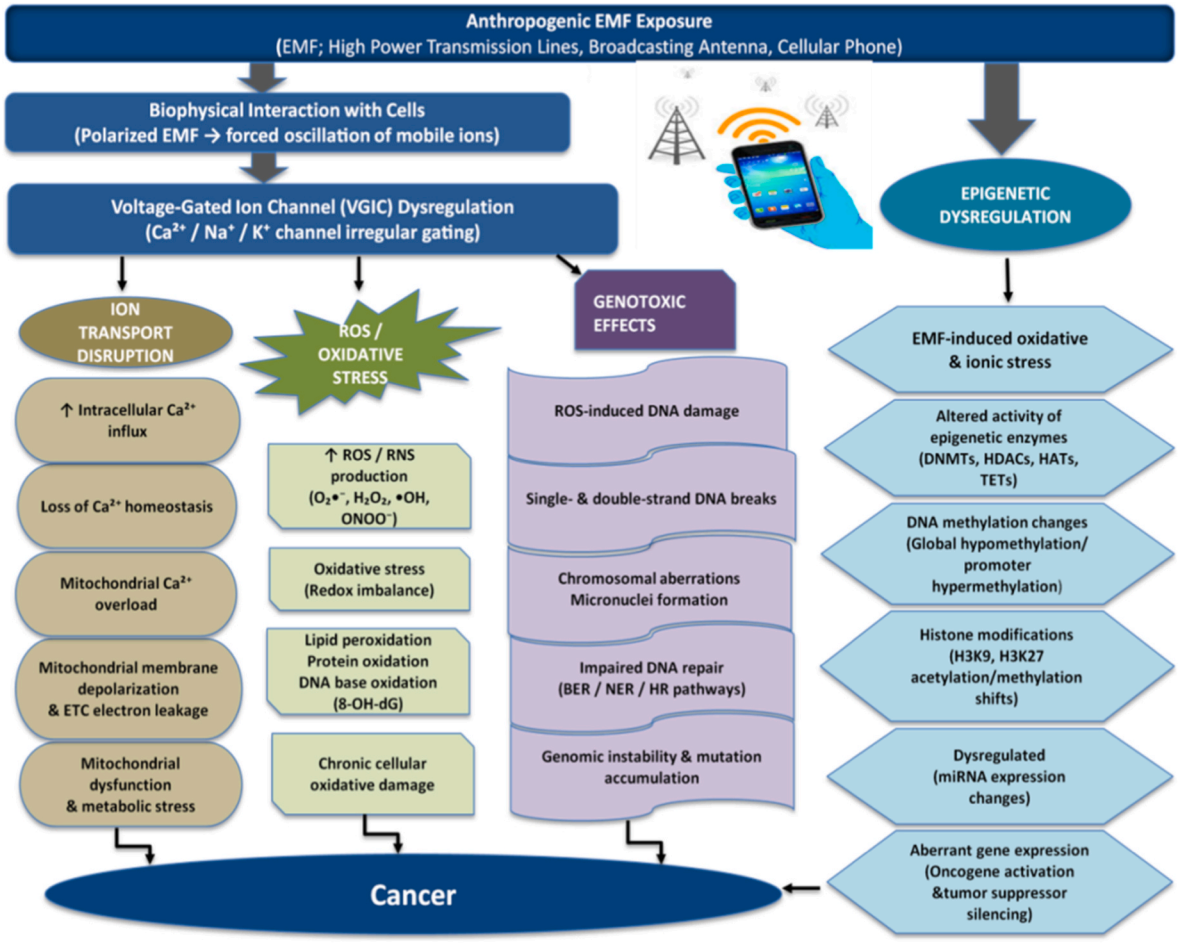
S rozvojom a rastúcim dopytom po rádiokomunikácii sa vystavenie magnetickým poliam stalo rozšíreným kvôli všadeprítomnému používaniu vysokovýkonných prenosových vedení a domácich spotrebičov (50 – 60 Hz). Štúdie uvádzajú, že vystavenie extrémne nízkofrekvenčnému magnetickému poľu generovanému elektrickým vedením a domácimi spotrebičmi je spojené s detskou leukémiou [16]. Metaanalýza prípadových kontrolných a kohortových štúdií naznačila, že vystavenie extrémne nízkofrekvenčnému magnetickému poľu s intenzitou vyššou ako 0,4 μT zvyšuje riziko leukémie u detí a pravdepodobne je spojené s akútnou lymfoblastickou leukémiou, ktorá sa zvyšuje pri dlhodobej expozícii [17].

### *3.2. Vysielacie antény*

Vysielacie antény sa vo všeobecnosti používajú na vysielanie televízie a tradičného rozhlasu a pozostávajú z pásiem veľmi vysokých frekvencií (VHF, 174 – 230 MHz) a ultra vysokých frekvencií (UHF, 470 – 862 MHz) [18 rokov]. Predpokladá sa, že emisie RF-EMF z týchto antén spôsobujú rakovinu u detí, avšak pri nízkej úrovni expozície neboli identifikované [4,19Štúdia na geneticky modifikovaných myšiach, ktoré boli vytvorené náchylnými na lymfóm, preukázala pozoruhodne zvýšené miery výskytu lymfómu a naznačila jeho súvislosť s rakovinou [ 20]. Ďalej, štúdia akútnej lymfoblastickej leukémie (ALL) a iných nemyeloidných leukémií pozorovaných v oblastiach v blízkosti televíznych vysielacích veží v severnom Sydney a autori tvrdia, že došlo k výrazne vyššiemu počtu prípadov úmrtnosti v dôsledku ALL [21].

### *3.3. Mobilné telefóny*

S pokrokom v technológii sa rozširuje používanie bezdrôtových




**Obr. 2. Schematický diagram vystavenia sa elektromagnetickým poliam a súvisiacich reakcií:**DNMT – DNA metyltransferázy; HDAC – históndeacetylázy; HAT – histónacetyltransferázy; TET – translokačné enzýmy Ten-Eleven.

Komunikácia sa rozšírila. Mobilný telefón sa stal neoddeliteľnou súčasťou nášho každodenného života, pretože ho ľudia vo veľkej miere využívajú na svoju bežnú prácu. S vývojom bezdrôtovej technológie z prvej generácie (1G) na piatu generáciu (5G), od základných telefónov k telefónom s globálnym pripojením, sa používanie mobilného telefónu stalo nevyhnutnosťou pre bežný život každého človeka. Okrem toho, vývoj niekoľkých užívateľsky prívetivých mobilných aplikácií súvisiacich s obchodom, komunikáciou a základnými službami ich urobil nevyhnutnosťou pre bežnú prácu. V dôsledku toho sú ľudia, ktorí sa pri svojich bežných činnostiach spoliehajú na mobilný telefón, nevedomky vystavení vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu, čo vyvoláva obavy týkajúce sa jeho negatívnych účinkov na zdravie [22,23]. Bolo vykonaných niekoľko výskumov na preskúmanie účinkov RF-EMF na ľudské zdravie. Niektoré štúdie boli vykonané s cieľom zistiť súvislosť medzi rýchlym používaním mobilných telefónov a rizikom nádorov [22,24,25]. Metaanalýza prípadovo-kontrolných štúdií zistila významnú súvislosť medzi kumulatívnym používaním mobilného telefónu (1000 hodín alebo viac počas života) a zvýšeným rizikom vzniku nádoru [24]. Vzťah medzi vystavením sa mobilným telefónom a rizikom gliómu, najbežnejšieho typu mozgového nádoru, bol dôkladne skúmaný a preukázal sa, že existuje významná a pozitívna súvislosť gliómu s dlhodobým používaním mobilných telefónov [22, 26, 27]. Naproti tomu kohortová štúdia uviedla, že dlhodobé používanie mobilného telefónu nie je spojené s pravdepodobnosťou vzniku gliómu, meningiómu alebo akustického neurómu [25Podobne aj metaanalýza uvádza slabú súvislosť medzi rizikom meningiómu a používaním mobilného telefónu s potrebou ďalšieho overenia (Chen a kol., 2021).

## 4. Biofyzikálne parametre

Rozsah škodlivých účinkov v dôsledku ožiarenia je sprostredkovaný biofyzikálnymi parametrami, ktoré určujú dávku, distribúciu a spôsob interakcie. Biofyzikálne parametre špecifikujú biologické a fyzikálne parametre, ktoré kvantifikujú mieru absorpcie a stanovujú citlivosť na schopnosť neionizujúceho žiarenia (RF-EMF alebo ELF-MF) absorbovať sa, preniknúť do tkanív a vyvolať biologické reakcie, je určená ich biofyzikálnymi parametrami.

Rozsah žiarenia je určený hustotou výkonu a špecifickou mierou absorpcie (SAR). SAR je dozimetrická veličina používaná na určenie miery absorpcie rádiofrekvenčného neionizujúceho žiarenia v biologických tkanivách. Miera absorpcie sa kvantifikuje na jednotku hmotnosti a meria sa vo W/kg. Vzorec na výpočet hodnoty SAR je znázornený v rovnici (1) (Kumar a kol., 2013).

$$SAR = \sigma E^2 / \rho \quad \text{Rovnica 1}$$

Kde σ je elektrická vodivosť tkaniva (S/m), E je stredná kvadratická hodnota (RMS) intenzity elektrického poľa (V/m) a ρ je hustota tkaniva (kg/m3)

Federálna komunikačná komisia (FCC) obmedzuje lokalizovaný SAR z mobilných telefónov na 1,6 W/kg v priemere na 1 g tkaniva. Naproti tomu Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) a európske smernice stanovujú limit 2 W/kg v priemere na 10 g tkaniva [28]. Preto by hodnota SAR pre akýkoľvek mobilný telefón mala byť buď menšia, alebo rovnaká ako uvedená hodnota, aby bola v rámci povoleného rozsahu expozície.

Hustota výkonu ($P_{deň}$) opisuje tok energie na jednotku plochy a vyjadruje sa vo wattoch na meter štvorcový ($W/m_2$), vzorec pre to isté je reprezentovaný rovnicami (2) a (3).

Hustota výkonu ($P_{deň}$) $= V_2 / 1200\ \Pi W\ m_2$ Rovnica 2

$P_{deň} = E_2 / 377\ W\ m_2$ Rovnica 3

Kde E = RMS sila elektrického poľa (V/m) a 377Ω je impedancia voľného priestoru (Biologická pracovná skupina CSaDC 2012)

Bezdrôtové komunikačné technológie využívajú širokú škálu frekvenčných pásiem. GSM (2G) zvyčajne pracuje v pásmach 900 MHz a 1800 MHz. Siete tretej generácie zvyčajne pracujú v rozsahu 800 MHz až 2,1 GHz a siete štvrtej generácie (4G LTE) pracujú vo frekvenčných pásmach od 700 MHz do 2,6 GHz v závislosti od regiónu a operátora. Siete 5G používajú frekvenčné pásma pod 6 GHz (FR1), ako aj milimetrové vlnové pásma (FR2; ~24 – 47 GHz).29]. Okrem toho technológie Wi-Fi zvyčajne fungujú na frekvenčných pásmach 2,4 GHz a 5 GHz.

Potenciálne škodlivé účinky RF-EMF závisia od rýchlosti ich prenikania, po ktorej nasledujú ďalšie parametre vrátane intenzity, permitivity, vodivosti, geometrie, tvaru a dĺžky biologického systému [15].

## 5. Mechanizmus účinku

Biologický účinok sprostredkovaný neionizujúcim žiarením závisí hlavne od jeho frekvencie a energetickej hladiny. Biologické účinky indukované NIR sú sprostredkované prevažne netepelným mechanizmom. Schematický diagram mechanizmu účinku bunkových reakcií indukovaných RF-EMF je znázornený na Obr. 2Hoci niekoľko experimentálnych štúdií uvádza biologické účinky po vystavení RF-EMF, zistenia získané zo systémov in vitro s použitím trvania expozície, intenzity alebo hodnôt SAR nemusia priamo odrážať typické podmienky vystavenia verejnosti. Preto by sa mechanistické pozorovania mali pri extrapolácii na účinky na ľudské zdravie interpretovať opatrne.

### *5.1. Tvorba reaktívnych foriem kyslíka (ROS) indukovaná netepelnými EMF a jej úloha v karcinogenéze*

V priebehu rokov množstvo experimentálnych dôkazov naznačovalo, že netermálne vystavenie elektromagnetickým poliam (EMF) vedie k oxidačnému stresu. Toto zvýšenie oxidačného stresu je sprostredkované najmä aberantnou tvorbou reaktívnych foriem kyslíka (ROS) [30].Súvislosť nadmernej tvorby ROS a oxidačného stresu predstavuje jeden z ústredných bodov pri podpore karcinogenézy [31]. Viaceré štúdie in vitro a in vivo preukázali, že antropogénne zdroje elektromagnetických vĺn (EMF) môžu spôsobiť aberantnú tvorbu ROS. Táto tvorba ROS sprostredkovaná EMF prebieha bez podstatného zahrievania tkaniva, čo sa líši od paradigmy tepelne indukovaných biologických účinkov EMF [30,32].

Existuje hypotéza, že vystavenie elektromagnetickým polím poškodzuje funkciu membránovo asociovaných nikotínamid-adenín-dinukleotid-fosfát/nikotínamid-adenín-inukleotid (NADPH/NADH) oxidáz, mitochondriálneho reťazca transportu elektrónov a syntázy oxidu dusnatého. Toto možné narušenie normálnej bunkovej homeostázy môže viesť k nadprodukcii superoxidového aniónu, peroxidu vodíka a peroxynitritu [32,33 Panagopoulos a kol., 2025, navrhli zdôvodnenie mechanizmu iónovo vynútenej oscilácie – napäťovo riadeného iónového kanála (IFO-VGIC) po vystavení elektromagnetickému žiareniu. Tento mechanizmus skúma, ako neionizačné žiarenie spôsobuje zhoršenú funkciu vápnikových a sodíkových kanálov. Aberantné fungovanie iónových kanálov sa prejavuje intracelulárnou iónovou nerovnováhou a sekundárnou tvorbou ROS [30 ].Táto chybná funkcia iónového kanála spôsobuje zvýšené hladiny intracelulárnych vápnikových iónov. Predpokladá sa, že zvýšené hladiny vápnikových iónov spôsobujú mitochondriálnu dereguláciu a redoxne citlivé signálne dráhy, čo vedie k oxidačnému stresu.

Úloha ROS je dobre známa ako etiologický faktor tumorigenéza. Zvýšené hladiny ROS podporujú iniciáciu, rast a progresiu nádoru prostredníctvom poškodenia lipidov, proteínov a nukleových kyselín [34]. Zvýšené hladiny ROS sú spojené s vyššími hladinami 8-hydroxy-2-deoxyguanozínu (8-OH-dG), peroxidáciou lipidov a dysfunkčnou antioxidačnou obranou receptívne [15,32]. Výsledná situácia spôsobuje narušený mechanizmus opravy DNA, čo sa prejavuje genomickou instabilitou za podmienok chronickej expozície (Obr. 2).

Okrem toho, ROS tiež plní úlohu signálnych dráh sekundárnych poslov. Aktivuje signálnu kaskádu zahŕňajúcu transkripčné faktory, ako sú NF-κB, AP-1 a HIF-1α. Tieto transkripčné faktory sa podieľajú na genomickej kontrole reguláciou bunkovej proliferácie, zápalu, angiogenézy a apoptózy [34].

Oxidačný stres vyvolaný netermálnym elektromagnetickým žiarením môže teda iniciovať poškodenie DNA a podporovať onkogénne mikroprostredie. Zhrnutie týchto zistení potvrdzuje súvislosť medzi vystavením elektromagnetickým poliam, tvorbou ROS a následnou malígnou transformáciou [35]. Okrem toho, všetky štúdie nezopakovali zistenia súvisiace s oxidačným stresom kvôli rozdielom v expozičných protokoloch, dozimetrii a biologickým modelom, ktoré by mohli prispieť k pozorovanej variabilite.

### *5.2. Genotoxické účinky vystavenia sa netermálnym elektromagnetickým poliam a genomická nestabilita*

Genotoxicita predstavuje kľúčové prepojenie medzi vystavením elektromagnetickým poliam a karcinogenézou. Hoci elektromagnetické polia majú neionizujúcu povahu, dostupné dôkazy naznačujú ich úlohu pri spôsobovaní nepriameho poškodenia DNA. Poškodenie DNA nepriamymi spôsobmi sa prevažne deje oxidačnými a redoxnými dráhami. Nepriame poškodenie DNA sprostredkované elektromagnetickými poliami môže vyústiť do genomickej nestability, ktorá je charakteristickým znakom rakoviny [30,35].

Uvádza sa, že vystavenie žiareniu s nízkou intenzitou spôsobuje jednovláknové a dvojvláknové zlomy DNA, tvorbu mikrojadier, chromozómové aberácie a modifikácie báz DNA [32,36]. ROS generované po vystavení EMF sú schopné atakovať DNA bázy a cukorno-fosfátový reťazec. Tento útok na DNA sprostredkovaný ROS môže spôsobiť mutagénne miesta, ako je 8-OH-dG, a ovplyvniť integritu DNA (Obr. 2) [34].

Okrem toho sa uvádza, že vystavenie elektromagnetickým poliam bráni opravným dráham DNA. Dôležité proteíny na opravu DNA, ako napríklad PARP-1, ATM a p53, vykazujú zmenenú expresiu a aktivitu po chronickom vystavení elektromagnetickým poliam. Zhoršená funkcia týchto životne dôležitých proteínov na opravu DNA je spojená s oslabeným bunkovým potenciálom na opravu oxidačného poškodenia [35]. Poškodenie DNA spojené s neúčinným procesom opravy znižuje pravdepodobnosť opravy mutácií počas replikácie, čo vedie k malígnemu rastu. Predchádzajúce správy o reprodukčnej toxicite tento mechanizmus ďalej potvrdzujú. Uvádza sa, že vystavenie sa netermálnemu RF-EMF je spojené s fragmentáciou DNA a oxidačným poškodením báz v zárodočných bunkách [15].

Okrem toho, iné environmentálne karcinogény pôsobia v synergii s elektromagnetickým žiarením a spôsobujú genomickú nestabilitu. Toto synergické spojenie medzi environmentálnymi karcinogénnymi elektromagnetickými políčkami môže prispievať k malígnej transformácii [35 Celkovo súčasné dôkazy ukazujú, že vystavenie sa netepelným elektromagnetickým poliam prejavuje nepriamy genotoxický účinok spôsobený oxidačným poškodením a zhoršenou opravou DNA. To potvrdzuje klasifikáciu elektromagnetických polí ako potenciálnych karcinogénnych rizikových faktorov.

### *5.3. Vplyv vystavenia netepelným elektromagnetickým poliam na transport iónov, bunkovú signalizáciu a dráhy súvisiace s rakovinou*

Ďalším dôležitým spôsobom, akým môže vystavenie netepelným EMF prispievať ku karcinogenéze, je narušenie iónovej homeostázy a membránovej signalizácie. Vzhľadom na nabitú povahu ich napäťových senzorov sú najmä bunkové iónové kanály, napäťovo riadené vápnikové kanály (VGCC), mimoriadne citlivé na oscilujúce elektromagnetické polia [30Model iónovo vynútenej oscilácie/VGCC bol navrhnutý ako možný mechanizmus na vysvetlenie niektorých biologických reakcií na vystavenie elektromagnetickým poliam. Experimentálne overenie však zostáva obmedzené a na preukázanie jeho biologickej relevantnosti sú potrebné ďalšie štúdie.

Model iónovo vynútenej oscilácie uvádza, že abnormálny kanál

Vrátkovanie a predĺžený prítok vápnika sú výsledkom síl, ktorými ELF a ELF-modulované RF EMF pôsobia na mobilné ióny vo vnútri pórov kanála [30]. Zvýšený intracelulárny vápnik je silným katalyzátorom pre tvorbu reaktívnych foriem kyslíka (ROS) v mitochondriách, aktiváciu vápnik-dependentných kináz a dysreguláciu apoptózy, čo všetko je nevyhnutné pre rozvoj rakoviny. Bolo hlásené, že zvýšený cytozolický Ca2+ aktivuje dráhy MAPK, PKC a PI3K/Akt, čím zvyšuje prežitie a proliferáciu buniek v stresových prostrediach [32].

Transkripčná regulácia je nepriamo ovplyvnená zmeneným transportom iónov, ktorý tiež mení membránový potenciál a redoxnú rovnováhu. Aktivácia NF-κB a AP-1 vedie k poruche vápnika vyvolanej EMF, čo zvyšuje expresiu zápalových mediátorov a protoonkogénov [34 Toto priaznivé bunkové prostredie podporuje vývoj a progresiu nádoru, ktorú uľahčujú tieto signálne kaskády.

Okrem toho, elektromagnetické žiarenie spôsobuje narušenie aktivity sodno-draselnej ATPázy a intracelulárnej regulácie pH. Narušenie pH môže narušiť bunkovú homeostázu, čo podporuje glykolýzu a proliferačný sklon, čo je charakteristické pre rakovinové bunky [35Netermálne elektromagnetické pole teda ovplyvňuje transport iónov integráciou oxidačného stresu, genotoxicity a aberantnej signalizácie. Celkovo tieto správy považujú dysfunkciu iónových kanálov za kľúčový mediátor spájajúci vystavenie elektromagnetickým poliam s karcinogénnymi signálnymi sieťami.

*5.4. Epigenetické mechanizmy, ktoré sú základom vzniku rakoviny súvisiacej s EMF*

Úloha epigenetického preprogramovania bola nedávno preskúmaná pri vystavení elektromagnetickým poliam (EMF). Keďže EMF nemá dostatočnú energiu na vyvolanie priamych zlomov DNA, dostupné dôkazy ukazujú, že môže zmeniť génovú expresiu prostredníctvom epigenetických zmien. Zmeny metylácie génov, modifikácie histónov, hladiny expresie miRNA a remodelácia chromatínu vytvárajú prospešné epigenetické podmienky pre malígnu transformáciu.

Epigenetické zmeny sa spájajú s mechanizmom biologických účinkov sprostredkovaných elektromagnetickými políčkami [37,38]. Medzi tieto zmeny patrí zvýšená aktivita mikroRNA [39], zmeny v prestavbe chromatínu [ 40, 41] a zmeny v úrovniach metylácie DNA [42].

[42], uviedli 114 génov, ktoré vykazovali významný rozdiel metylácia po expozícii RF-EMP v porovnaní so simulovanou expozíciou. Korelácia s génovou expresiou odhalila šesť spoločných cieľov, ktoré vykazovali rozdielnu metyláciu a expresiu v reakcii na expozíciu RF-EMP. Tieto gény slúžia na udržanie kritických bunkových funkcií, ako je napríklad reakcia na poškodenie prežitia buniek. Dôkazy z niektorých ďalších štúdií potvrdzujú tieto pozorovania [43]; uviedli, že vystavenie ELF-EMF zvyšuje globálnu metyláciu DNA a zároveň zhoršuje expresiu DNA metyltransferázy, čo sa prejavuje zvýšenými hladinami DNMT1 a zníženými hladinami DNMT3a. Keďže DNMT1 si zachováva metylačný vzorec počas bunkového delenia, tieto zmeny spôsobujú EMF indukované stabilné a dedičné epigenetické zmeny.

Okrem metylácie DNA sa uvádza, že vystavenie elektromagnetickým poliam ovplyvnilo aj modifikácie histónov a remodeláciu chromatínu. V jednej predchádzajúcej štúdii autori uviedli, že Schwannove bunky podliehajú aberantným metylačným zmenám po vystavení elektromagnetickým poliam [44]. V Schwannových bunkách tieto zmeny smerujú bunku k menej diferencovanému bunkovému fenotypu. Toto epigenetické preprogramovanie umožňuje transformáciu Schwannových buniek a vývoj schwannómu.

*5.5. Narušenie apoptózy a kontrolných bodov bunkového cyklu*

Narušenie bunkového cyklu je bežnou biologickou reakciou na vystavenie elektromagnetickému poľu (EMP). Porušenie bunkového cyklu predstavuje kľúčový krok na ceste k karcinogenéze. Množstvo dostupných dôkazov dokazuje, že vystavenie EMP ovplyvňuje tieto procesy tým, že spôsobuje stresové reakcie bez účinnej apoptotickej odpovede [45]. V jednej štúdii [46], preukázali zmenu aktivity CASP3 a CASP7 v rôznych bunkových typoch, vrátane ľudskej leukémie (K562), endotelových a epitelových bunkových línií po expozícii ELF-EMF. Namiesto účinného eliminácie poškodených buniek tieto výsledky ukazujú neúplnú alebo deregulovanú apoptózu, stav, o ktorom je známe, že podporuje vývoj malígnych buniek.

Potvrdzujú to skoršie práce zhrnuté v Ref. [47]; odhalili, že neionizujúce žiarenie (ELF-MF alebo RF-EMF) môže modulovať expresiu génov súvisiacich s apoptózou a regulačných génov bunkového cyklu. TP53, centrálny gén supresora nádoru, je narušený neionizujúcim žiarením, čo ďalej oslabuje vykonávanie kontrolných bodov a podporuje prežitie buniek v stresových podmienkach [46]. poskytla ďalší pohľad demonštrujúci nadmernú expresiu génov rodiny GADD45 indukovanú EMF, ktorá pretína apoptózu, zastavenie bunkového cyklu a reakciu na poškodenie DNA. Zatiaľ čo dočasná aktivácia GADD45 ponúka ochranu, pretrvávajúca alebo dysregulovaná expresia bola spojená s nevhodným prežitím buniek, známym skorým štádiom karcinogenézy a narušenou kontrolou kontrolných bodov [48]. Jedným z dôležitých mediátorov v tomto procese je oxidačný stres, ktorý ukázal, že vystavenie elektromagnetickým poliam (EMF) môže znížiť apoptózu závislú od p53 a oddeliť zastavenie bunkového cyklu od apoptotického záväzku generovaním reaktívnych foriem kyslíka a zmenou signalizácie syntázy oxidu dusnatého [46].

## 6. Neionizujúce žiarenie a súvisiaca karcinogenita

### *6.1. Leukémia*

Leukémia je jedným z rozšírených druhov rakoviny u detí. Medzi množstvom rizikových faktorov jej etiológie je úloha ionizujúceho a neionizujúceho žiarenia nedostatočne pochopená [49 – 51]. Konkrétne existujú dôkazy o vzťahu medzi dávkou a reakciou medzi detskou leukémiou a magnetickými poľami s extrémne nízkou frekvenciou ([17,52]; Tamtiež a kol., 2021).

Epidemiologické štúdie skúmajúce úlohu vystavenia elektromagnetickému poľu (EMF) a leukémii sa zamerali najmä na detskú leukémiu. Bola hlásená konzistentná súvislosť medzi vystavením extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam (ELF-MF) v domácnostiach a detskou leukémiou. Niektoré predchádzajúce metaanalytické štúdie ukazujú, že deti vystavené vyšším priemerným úrovniam magnetického poľa v domácnostiach vykazujú vyššiu pravdepodobnosť leukémie, ktorá sa pohybuje medzi 1,4 a 2,0 (Id a kol., 2021; [52]; L [53]). Nedávne výskumy potvrdili toto zistenie a naznačili vzťah medzi dávkou a odpoveďou ([17]; Id a kol., 2021). V zastrešujúcom prehľade environmentálnych rizikových faktorov sa uvádza, že vystavenie ELF-MF je jedným z predispozičných faktorov vzniku ALL [54].

Niektoré populačné prípadovo-kontrolné štúdie skúmali riziko leukémie vo vzťahu k vzdialenosti bydliska od vysokonapäťových elektrických vedení. Mierne riziká boli hlásené u detí žijúcich v blízkych vzdialenostiach (približne<50 – 100 m), zatiaľ čo odhady rizika sa s väčšími vzdialenosťami znižovali [55]."Malagoli a kol. uviedli zvýšené riziko detskej leukémie u detí žijúcich do 100 m od vysokonapäťových prenosových vedení v porovnaní s deťmi žijúcimi ≥400 m ďaleko, čo naznačuje možnú súvislosť medzi blízkosťou obytných budov k elektrickému vedeniu a rizikom leukémie. Vystavenie obytných budov magnetickým poliam z transformátorových staníc však nepreukázalo súvislosť s rizikom leukémie [16].

Na rozdiel od ELF-MF, štúdie hodnotiace vystavenie rádiofrekvenčnému (RF-EMF) žiareniu zistili nejednoznačné zistenia týkajúce sa leukémie. Národné prípadovo-kontrolné štúdie hodnotiace vystavenie matky alebo v ranom veku žiareniu zo základňových staníc mobilných telefónov nezistili zvýšené riziko detskej leukémie alebo súvisiacich hematologických malignít [56Podobné zistenia boli hlásené aj zo systematických prehľadov, ktoré naznačujú, že vystavenie environmentálnym rádiofrekvenčným a elektromagnetickým poliam z pevných vysielačov a bezdrôtovej infraštruktúry nezvyšuje riziko leukémie u detí [24]. Okrem toho hĺbkový a systematický prehľad zadaný WHO nepreukázal pravdepodobnosť zvýšenia rizika detskej leukémie z prenosov s pevnými miestami [57].

Je dôležité poznamenať, že pozorovaná súvislosť s detskou leukémiou súvisí prevažne s expozíciou ELF-MF z elektrického vedenia a elektrickej infraštruktúry. Vo všeobecnosti výsledky odhaľujú súvislosť medzi vyššou expozíciou ELF magnetickému poľu v domácnostiach a detskou leukémiou. Súčasné dôkazy však nepreukazujú podobnú...

konzistentná súvislosť medzi vystavením RF-EMF a detskou leukémiou.

### 6.2. Glióm/meningióm

Od začiatku roku 2000 prebieha dlhodobá diskusia o súvislosti medzi vystavením RF-EMF a prevalenciou mozgových nádorov. Súčasné hodnotenie vystavenia RF-EMF nie je dostatočné na objasnenie súvislosti mozgových nádorov s vystavením RF-EMF z mobilného telefónu kvôli rýchlo sa meniacim technológiám smartfónov a mobilných telefónov. Neionizujúce žiarenie je však spojené s rizikom mozgových nádorov a gliómu u dospelých [58], nebola pozorovaná žiadna významná súvislosť s detskými nádormi. Taktiež nebola hlásená žiadna súvislosť medzi detským gliómom a vystavením otca vplyvu pracovného prostredia [59] avšak vystavenie matky pracovnému prostrediu, najmä šijacím strojom, sa spája s rizikom nádoru CNS a gliómu [60].

Keďže neionizujúce žiarenie nemá dostatočnú energiu na ionizáciu atómov, jeho funkcia pri výskyte gliómov/meningiómov bola navrhnutá prostredníctvom nepriameho mechanizmu vedúceho k nádorovému výsledku. Uvádza sa, že vystavenie RF-EMF indukuje reaktívne formy kyslíka (ROS), čo vedie k poškodeniu DNA, chromozomálnej nestabilite a progresii nádoru mozgu [32,61]. Toto nízkofrekvenčné žiarenie môže tiež aktivovať signálne dráhy súvisiace so stresom, čo následne vedie k zmenenej génovej expresii a zvýšenému rastu nádoru [62]. Môže tiež prechodne zvýšiť priepustnosť hematoencefalickej bariéry a vytvoriť tak priaznivé prostredie pre progresiu nádoru [63]. Na preukázanie súvislosti medzi používaním mobilných telefónov a rizikom nádoru bolo vykonaných niekoľko metaanalýz, na preukázanie tejto súvislosti sú však potrebné ďalšie štúdie [8, 26,64,65]. Tieto štúdie však nedokázali pozorovať silný pozitívny vzťah medzi mozgovým nádorom a vystavením sa rádiofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu. Mierne pozitívny vzťah, ktorý zaznamenali štúdie Hardell a kol., s výskytom gliómu a akustického neurómu [10]. Na rozdiel od toho skupina Interphone nedokázala pozorovať štatisticky významnú súvislosť medzi rizikom nádoru na mozgu a ľahkým používaním mobilného telefónu, avšak významná súvislosť s gliómom a akustickým neurómom sa pozorovala iba pri dlhodobom používaní mobilného telefónu. Ďalšia nezávislá štúdia podporila dôkazy skupiny Interphone a uviedla, že neexistuje žiadna súvislosť medzi rizikom nádoru a minimálnym používaním mobilného telefónu [24,66,67]. Podobne ako v tejto štúdii Coureaua a kol. sa uvádza, že glióm súvisí s dlhodobým používaním mobilného telefónu [68 Metaanalýza 19 prípadovo-kontrolných štúdií preukázala presnejšie merania expozície RF-EMF vrátane >10 rokov používania mobilného telefónu, ipsilaterálne používanie a vysoký kumulatívny čas hovorov súvisia s vysoko rizikovým gliómom [69].Dostupné dôkazy preto silne naznačujú, že neionizujúce žiarenie sa podieľa na progresii nádoru po dlhodobej a kumulatívnej expozícii [1] aj napriek tomu; na to, aby sa k tomu dalo jednoznačne vyjadriť, je potrebné vykonať ďalšie štúdie.

Podobne ako v prípade gliómu sa vykonalo niekoľko štúdií o výsledkoch meningiómu v dôsledku vystavenia vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu a pozorovali sa podobné výsledky ako v prípade gliómu. Štúdia, ktorú publikoval Interphone, preukázala, že používatelia mobilných telefónov nie sú spojení so zvýšeným rizikom meningiómu, je však potrebné vykonať ďalšie štúdie na monitorovanie rizika pri dlhodobom vystavení [70]. V spoločnej prípadovo-kontrolnej štúdii vykonanej v severoeurópskych krajinách sa zistilo, že pravidelné používanie mobilného telefónu nie je spojené s rizikom meningiómu, a to na základe štúdie celkového počtu 3 299 kontrolných osôb spolu s 1 209 prípadmi meningiómu [71]. Pri dlhodobom používaní mobilného telefónu, ako napríklad≥10 rokov je spojených s vysokým rizikom gliómu, v prípade meningiómu sa takýto dôkaz nepozoroval [9]. Podobne aj niekoľko ďalších štúdií uviedlo, že neexistuje žiadna súvislosť medzi vystavením sa mobilným telefónom a výskytom meningiómov [70,72 – 76]. Okrem toho, napriek dramatickému nárastu používania mobilných telefónov na celom svete od 90. rokov 20. storočia, miery incidencie gliómov upravené podľa veku zostali v niekoľkých národných registroch rakoviny prevažne stabilné. Tieto pozorovania poskytujú obmedzenú podporu pre silný karcinogénny účinok na úrovni populácie.

expozície RE-EMF [76].

Dôležité je, že množstvo rozsiahlych prospektívnych kohortových štúdií, vrátane dánskej kohortovej štúdie [73], štúdia Milión žien [75] a nedávna štúdia COSMOS [25].Prospektívne kohortové návrhy sú vo všeobecnosti menej náchylné na skreslenie z dôvodu opakovaného vyhodnotenia a výberu ako retrospektívne prípadovo-kontrolné štúdie, pretože informácie o expozícii sa zhromažďujú pred výskytom ochorenia. Okrem toho „Nedávny systematický prehľad, ktorý si objednala WHO, od Karipidisa a kol. [57] nenašli žiadne dôkazy o zvýšenom riziku rakoviny spojenom s vystavením RF-EMF z mobilných telefónov.“ Hoci niektoré štúdie, ktoré vykonali Hardell a kol., preukázali pozitívne súvislosti medzi dlhodobým používaním mobilných telefónov a rizikom nádoru na mozgu, tieto zistenia by sa mali interpretovať s opatrnosťou. Rovnako ako v prípade iných retrospektívnych prípadovo-kontrolných štúdií, objavili sa obavy týkajúce sa potenciálneho vplyvu skreslenia v spomienkach, skreslenia v účasti a rozdielov medzi výberom kontrolnej skupiny, ktoré môžu ovplyvniť odhady rizika. Preto by sa tieto zistenia mali posudzovať spolu s dôkazmi z rozsiahlych prospektívnych kohortových štúdií a analýz trendu incidencie založených na populácii. Tieto zistenia poskytujú dôležitý kontext pri interpretácii pozitívnych výsledkov z niektorých retrospektívnych prípadovo-kontrolných štúdií.

Systematický prehľad ukázal, že obdobie 10 rokov na pozorovanie škodlivých účinkov expozície nie je dostatočné a následky expozície možno potvrdiť prekročením trvania expozície (>10 rokov) [23Hoci súčasné štúdie neposkytujú pozitívnu koreláciu expozície s meningiómom, ďalšie štúdie so zvýšenou dobou expozície a veľkou vzorkou by mohli v tejto súvislosti pravdepodobne poskytnúť viac informácií.

### 6.3. Akustický neuróm

Akustický neuróm, tiež známy ako vestibulárny schwannóm, je benígny, pomaly rastúci nádor nachádzajúci sa na vestibulárnom kochleárnom nerve (hlavový nerv VIII) vo zvukovode v lebke (Schoemaker a kol., 2026). Keďže tlačí na susedné nervy a mozgové štruktúry, často vedie k strate sluchu na jednej strane, zvoneniu v ušiach, nestabilite a znecitliveniu tváre.

Niekoľko štúdií skúmalo súvislosť medzi akustickou neurómou a neionizačným žiarením; výsledky však boli nejednoznačné [77Niekoľko rozsiahlych prípadovo-kontrolných štúdií, najmä spolupráca Interphone zahŕňajúca viacero severoeurópskych krajín, nezistilo žiadnu celkovú súvislosť medzi pravidelným používaním mobilných telefónov a rizikom akustického neurómu, pričom pomer šancí bol 0,9 (95 % CI 0,7 – 1,1) medzi 678 prípadmi a 3 553 kontrolnými skupinami. Posúdenie expozície bolo založené na počte rokov používania mobilného telefónu počas celého života (0,5 – 4 roky) [78Podobne japonská prípadovo-kontrolná štúdia s 51 prípadmi a 192 porovnateľnými kontrolami nezistila žiadne významné zvýšenie rizika pri pravidelnom používaní mobilného telefónu (OR = 0,73, 95 % CI 0,43 – 1,23), pričom sa nepozoroval žiadny trend závislosti odpovede od dávky počas kumulatívnych rokov alebo času hovoru [79Niektoré analýzy však uvádzajú zvýšené riziká za špecifických podmienok expozície. Súhrnná analýza spoločnosti Interphone identifikovala zvýšené riziko vzniku akustickej neurómy na tej istej strane, ako bolo hlásené používanie telefónu pre...≥10 rokov (OR = 1,8, 95 % CI 1,1 – 3,1), hoci výskumníci zaznamenali obavy týkajúce sa skreslenia v súvislosti s hlásením laterality (Schoemaker a kol., 2006). Okrem toho, súhrnné analýzy výskumnej skupiny Hardell, ktoré zahŕňali vystavenie mobilným aj bezdrôtovým telefónom, preukázali zvýšené riziká akustického neurómu spojeného s dlhodobým používaním, pričom sa zdôraznili zvýšené riziká dlhej latencie a ipsilaterálnych expozičných vzorcov [80].

Stručne povedané, existujúci výskum poskytuje zložitú situáciu, pokiaľ ide o neionizujúce žiarenie a riziko akustického neurómu. Väčšina dôkazov naznačuje, že v prvých desiatich rokoch používania mobilných telefónov neexistuje žiadny významný vplyv. Napriek tomu v niektorých analýzach štúdií Interphone a Hardell sa zaznamenali zvýšené OR alebo trendy v OR pre dlhšie latencie a/alebo ipsilaterálne používanie mobilných telefónov u pravidelných ipsilaterálnych používateľov a u tých, ktorí majú≥10 rokov trvania expozície. Tak to bolo aj v prípade celkových výsledkov Interphone. Tieto neznáme

**Tabuľka 1**
Zoznam štúdií vykonaných na ľuďoch.

| S. Nie | Počet obyvateľov | Typ expozície a frekvencia | Vek skupina | Veľkosť vzorky | Návrh štúdie | Posúdenie expozície | Výsledok | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Dospelí | RF-EMF mobilného telefónu (800 – 2 000 MHz) | - | 5259 prípadov; 12 074 kontrol | Prípadová kontrola štúdium | Samostatne hlásená mobilná sieť používanie telefónu; trvanie ≥10 rokov | • Celkové riziko nádoru na mozgu sa nezvýšilo<br>• Dlhodobé užívanie (≥10 rokov) preukázali mierne zvýšenie rizika<br>• Žiadny nárast krátkodobých používateľov | [11] |
| 2 | Dospelí | RF-EMF mobilného telefónu (800 – 2 000 MHz) | - | 26 846 prípadov; 50 013 kontrol | Prípadová kontrola štúdium | Trvanie používania; ipsilaterálny vs. kontralaterálna expozícia | • Riziko intrakraniálneho nádoru sa zvýšilo po>10 rokov používania<br>• Ipsilaterálna expozícia spojené s vyšším rizikom<br>• Nie je zvýšené pri meningióme | [65] |
| 3 | Deti a dospievajúci | RF-EMF mobilného telefónu (800 – 2 000 MHz) | 7–19 roky | 352 prípadov; 646 ovládacie prvky | Prípadová kontrola štúdium | Rozhovory a záznamy operátora | • Žiadny významný nárast mozgových nádorov<br>• Žiadna dávka-odpoveď vzťah s hovorom trvanie<br>• Lokalizácia nádoru nesúvisiaca s expozíciou | [83] |
| 4 | Dospelí | RF-EMF mobilného telefónu (800 – 2 600 MHz) | - | 264 574 účastníkov | Potenciálny kohortová štúdia | Celoživotný čas hovoru (kalibrované vlastné hlásenie a údaje operátora) | • Žiadne zvýšené riziko gliómu, meningiómu alebo akustického ochorenia neuróm<br>• Dlhodobé užívanie (≥15 rokov) nie je spojené s nádormi | [25] |
| 5 | Deti | ELF-MF (50/60 Hz) z elektrického vedenia | <16 roky | 5788 prípadov; 5788 ovládacích prvkov | Prípadová kontrola štúdium | Vypočítané na základe GIS magnetické polia v mieste narodenia | • Mierne riziko leukémie v skupine s najvyššou expozíciou<br>• Nepresné odhady so širokým intervalom spoľahlivosti<br>• Zistenia sú v súlade s predchádzajúcimi združenými analýzami | [84] |
| 6 | Deti | ELF-MF (50 Hz) z vysokonapäťových elektrických vedení | 0–15 roky | 182 prípadov; 726 ovládacie prvky | Prípadová kontrola štúdium | Vzdialenosť od elektrického vedenia a magnetického poľa modelovanie | • Vyššie riziko detskej leukémie do 100 m od elektrické vedenia<br>• Sugestívny pomer dávky a reakcie na krátke vzdialenosti | [49] |
| 7 | Deti | ELF-MF (50 Hz) z transformátorových staníc | 0–15 roky | 182 prípadov; 726 ovládacie prvky | Prípadová kontrola štúdium | Blízkosť obytných budov (15 – 25 m nárazníkové pásy) | • Celkové riziko leukémie nie je významné<br>• Deti≥5 rokov preukázalo sugestívne zvýšené riziko | [16] |
| 8 | Ženy | Modré svetlo HEV (400 – 490 nm) z digitálnych obrazoviek | - | 301 prípadov; 294 ovládacie prvky | Prípadová kontrola štúdium | Čas strávený pred obrazovkou dotazník | • Silné nočné vystavenie žiareniu preukázalo možnú podporu rakoviny prsníka<br>• Celková asociácia slabá | [82] |
| 9 | Ženy | RF-EMF pre smartfóny (900 – 1800 MHz) | - | 211 prípadov; 894 ovládacie prvky | Prípadová kontrola štúdium | Závislosť od smartfónov, blízkosť, používanie pred spaním | • Riziko rakoviny prsníka sa zvyšuje so závislosťou od smartfónov<br>• Menšia vzdialenosť medzi telefónom a prsníkom zvyšuje riziko rakoviny prsníka | [81] |
| 10 | Pracovníci | Pracovné RF-EMF (10 MHz – 300 GHz) a IF-EMF (3 kHz – 10 MHz) | - | ~4 000 prípadov; ~5 000 kontrol | Prípadová kontrola štúdium | Matica expozície voči pracovnému miestu a rozhovory | • Celkové riziko nádoru na mozgu nie je významné<br>• Nedávne vystavenie vysokým rádiofrekvenčným lúčom naznačuje rozvoj nádorov | [85] |
| 11 | Ľudské prsia bunkové línie (MCF-7, MDA-MB-231; normálne M10) | ELF-EMF pri 7,83±0,3 Hz, 23,49±0,3 Hz, 39,15±0,3 Hz; 0,5–1 mT; 12–48 h; kontinuálna vs. prepínacia expozícia | V in vitro | 3 bunkové línie; experimenty opakované≥3 krát | Experimentálne v laboratórium in vitro štúdium | Riadená cievka Expozícia ELF-EMF systém; overená intenzita poľa; teplota udržiavané na 37±0,1◦C | • MDA-MB-231 (invazívny rakovina prsníka): silný inhibícia proliferácie pri 7,83 Hz, 1 mT, 6 h prepínacej expozície ( ≈60 % zníženie životaschopnosti)<br>• Indukovaná apoptóza (zvýšenie počtu skorých a neskorých apoptotických buniek)<br>• $Ca_{2+}$zvýšený prítok, čo naznačuje negenotoxickú inhibíciu rastu nádoru<br>• MCF-7: mierna inhibícia<br>• Normálne bunky M10: žiadna významná cytotoxicita | [86] |

Skratky: RF-EMF = Rádiofrekvenčné elektromagnetické pole; OR = Pomer šancí; CI = Interval spoľahlivosti; CNS = Centrálny nervový systém; HR = Pomer rizík; GIS =Geografický informačný systém; HEV = Vysokoenergetické viditeľné svetlo; ELF-MF = Extrémne nízkofrekvenčné magnetické pole; ALL = Akútna lymfoblastická leukémia; IF-EMF = Medzifrekvenčné elektromagnetické pole; ELF-EMF = Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické pole; Hz = Hertz; mT = militesla; $Ca_{2+}$= Vápnikový ión; M10 = Normálna bunková línia epitelu prsníka; MCF-7 = Bunková línia ľudského adenokarcinómu prsníka; MDA-MB-231 = Invazívna trojito negatívna bunková línia karcinómu prsníka.

**Tabuľka 2**
Zoznam štúdií vykonaných na zvieratách.

| S. Nie. | Modelový organizmus (krajina, typ štúdie, zvieratá) | Vek | Vystavenie typ | Frekvencia a trvanie expozície | Tkanivo/orgán a Cieľová oblasť | Výsledok (špecifický pre nádor; krátkodobý aodrážka) | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | SD potkany (samec, samica), Taliansko; LSB; ~2448 | Prenatálne→ ND | RF-EMF (GSM základná stanica) | 1,8 GHz; 19 hodín denne, doživotne | Srdce a mozog; CNS/Srdce | • ↑Výskyt HS u mužov<br>• ↑MGT u žien<br>• Nádor súvisiaci s RF rozvoj | [87] |
| 2. | Myši liečené ENU, Nemecko; TPS; ~100/grp | Prenatálne→ dospelý | RF-EMF | SAR: 0,04–2 W/kg; celoživotné | Pľúca, pečeň a Lymfoidný; systémový | • ↑výskyt nádorov pľúc a pečene<br>• ↑Frekvencia LY | [88] |
| 3. | SD potkany (samec, samica), USA; NTP-CS; 90/pohlavie/sk. | IU→2 roky | Rádiové vysielanie (GSM/ CDMA) | 900 MHz; SAR 1,5, 3,6 W/kg; 9 hodín/deň, 10 minút cyklus ZAP/VYP, 2 roky | Srdce a mozog; CNS/srdce | • ↑Malígne gliómy mozgu (samce potkanov)<br>• ↑Výskyt HS<br>• Najsilnejšie pozitívne zistenia medzi štúdiami NTP | [89] |
| 4. | Myši B6C3F1/N (samce, (žena), USA; 2-YB; 90/ pohlavie/sk. | Dospelý | Rádiová frekvencia (GSM/ CDMA) | 1,9 GHz; SAR 2,5, 5, 10 W/kg; 9 hodín/deň, 10 minút cykly ZAP/VYP, 2 roky | Koža, pľúca, pečeň a lymfatické uzliny; WB | • ↑ML u žien<br>• ↑nádory pľúc a pečene u mužov<br>• Nejednoznačné dôkazy o karcinogénnej aktivite<br>• ↑Hepatoblastóm/nádory pečene (muži, CDMA) | [90] |

Skratky ELF-EMF – Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické pole; ND – Prirodzená smrť; TG – Rast nádoru; CTS – Štúdia kontrolovaného nádoru CRC – Kolorektálny karcinóm; AM – Amplitúdová modulácia; CM – Bunková membrána; IV – In vitro; IVV – In vivo ENU – Etylnitrózomočovina; TPS – Štúdia promocie nádoru; SAR – Špecifická miera absorpcie; LY – Lymfóm SCID – Ťažká kombinovaná imunodeficiencia; RFR – Rádiofrekvenčné žiarenie; IU – In utero; WB – Celé telo; NTP-CS – Štúdia karcinogenity Národného toxikologického programu; HS – Schwannóm srdca; CDMA – Viacnásobný prístup s delením kódu; ML – Malígny lymfóm; GSM – Globálny systém pre mobilnú komunikáciu; LSB – Biotest dĺžky života; TPS – Štúdia promocie nádoru; CS – Štúdia karcinogenity; MHz – Megahertz; GHz – Gigahertz.

preukazujú, že je potrebný rozsiahlejší výskum vrátane štúdií vo väčšom meradle, ktoré prospektívne zhromažďujú informácie o expozícii a majú dostatočne dlhé obdobia sledovania, aby sa zistilo, či dlhodobé vystavenie neionizujúcemu žiareniu predstavuje skutočnú hrozbu pre akustický neuróm, alebo či...

*6.4. Rakovina prsníka*

Epidemiologické dôkazy priniesli zmiešané, ale významné zistenia týkajúce sa rizika rakoviny prsníka v dôsledku RF-EMF. Prípadová kontrolná štúdia vykonaná medzi taiwanskými ženami uviedla, že nadmerné používanie smartfónov vrátane závislosti od smartfónov, ich pravidelného používania dlhšie ako 4,5 minúty pred zaspaním a nosenia smartfónu vo vnútornej podprsenke bolo spojené s výrazne zvýšeným rizikom rakoviny prsníka [81].

Vedci skúmali, či by vystavenie neionizujúcemu žiareniu zo smartfónov a iných digitálnych zariadení mohlo byť možným rizikovým faktorom rakoviny prsníka. Veria, že by sa to mohlo diať procesom, v ktorom rádiofrekvenčné (RF) žiarenie a vysokoenergetické viditeľné (HEV) modré svetlo ovplyvňujú biologické hodiny tela (narušenie cirkadiánneho cyklu). V Mortazaviho retrospektívnej prípadovo-kontrolnej štúdii (2024) mali intenzívni používatelia mobilných telefónov v skupine s rakovinou prsníka výrazne vyššiu kumulatívnu 10-ročnú expozíciu digitálnym obrazovkám ako v kontrolnej skupine (7089±14985 oproti 4052±12515 h; p = 0,038), autori však dospeli k záveru, že celková súvislosť medzi vystavením modrému svetlu a rakovinou prsníka nebola konzistentne silná. Logistická regresná analýza ukázala, že u intenzívnych užívateľov digitálnych obrazoviek>30 minút/deň pri slabom svetle pred spaním prinieslo pomer šancí (OR) 1,156 (95 % CI: 0,63 – 2,12), hoci to nebolo štatisticky významné [82].

Naopak, štúdia, ktorú vykonali Shih a kol. [81] zistili, že súvislosti medzi používaním smartfónov a rizikom rakoviny prsníka boli silnejšie. Pomer rizika rakoviny prsníka u žien so závislosťou od smartfónov bol podľa multivariačnej analýzy 1,43 (95 % CI: 1,01 – 2,02). Návykové používanie smartfónov>Nosenie smartfónu 4,5 minúty pred spaním bolo spojené s výrazne zvýšeným 5,27-násobným rizikom (AOR = 5,27; 95 % CI: 3,52 – 7,88). Okrem toho, udržiavanie krátkej vzdialenosti (~10 cm) medzi smartfónom a prsníkmi počas používania zvýšilo riziko 1,59-násobne (AOR = 1,59; 95 % CI: 1,00 – 2,53), zatiaľ čo nosenie smartfónu v blízkosti hrudníka alebo oblasti pásu a brucha viedlo k 5,03-násobnému (95 % CI: 1,75–14,44) a 4,06-násobne (95 % CI: 2,11–7,78) vyššie riziko. Synergický efekt sa pozoroval u účastníkov so závislosťou od smartfónov, ktorí tiež používali smartfóny.>4,5 minúty pred spaním malo 6,88-násobne zvýšené riziko (AOR = 6,88; 95 % CI: 4,07 – 11,61) [81Tieto zistenia však naznačujú možnú súvislosť; interpretácia je však obmedzená retrospektívnym dizajnom prípadov a kontrol, subjektívne hláseným hodnotením expozície a potenciálnym reziduálnym mätúcim faktorom.

Celkové výsledky naznačujú, že dlhodobé vystavenie neionizujúcemu žiareniu zo smartfónov, najmä dlhé hodiny používania, používanie v noci a používanie na účely podobné závislosti, by mohlo zvýšiť riziko rakoviny prsníka prostredníctvom oxidačného stresu vyvolaného rádiofrekvenčným vyžarovaním a narušeného cirkadiánneho rytmu súvisiaceho s potlačením melatonínu; keďže však niekoľko štúdií preukázalo silné upravené a významné OR a niekoľko hlásilo upravené a nevýznamné súvislosti, zatiaľ nie je možné vyvodiť konečný záver.

Pre ľahšiu interpretáciu sme zhrnuli rôzne prípadové štúdie (Tabuľky 1 a 2) so zvýraznením podrobností o expozícii spolu s veľkosťou vzorky, populáciou, dizajnom štúdie a ich výsledkami v prípade štúdií na ľuďoch a modelového organizmu, ich veku, podrobností o expozícii a jej výsledkoch v prípade štúdií na zvieratách. Zahrnutá tabuľka obsahuje podrobnosti o štúdiách vykonaných na ľuďoch (Tabuľka 1) a zvieratá (Tabuľka 2Štúdie na zvieratách vykonané Národným toxikologickým programom (NTP) a Ramazziniho inštitútom preukázali určité nádorové nálezy po celoživotnom vystavení sa rádiofrekvenčným a elektromagnetickým poliam. Štúdia NTP na potkanoch (TR-595) preukázala zvýšený výskyt malígnych schwannómov srdca a gliómov u samcov potkanov Sprague Dawley vystavených zvyšujúcim sa hladinám SAR pre celé telo 1,5, 3 a 6 W/kg. Štúdie na zvieratách je však ťažké interpretovať, pretože podmienky expozície sa značne líšia, čo sa týka vystavenia celého tela, vysokých hladín SAR, pohlavne špecifických účinkov a rozdielov v prežití medzi exponovanou a kontrolnou skupinou. Tieto obmedzenia by sa mali zohľadniť pri extrapolácii zistení na riziko rakoviny u ľudí.

## 7. Záver zo súčasných dôkazov

Napriek dlhodobým výskumom zostala súvislosť medzi neionizujúcim elektromagnetickým poľom a súvisiacou karcinogenitou nejednoznačná. Hlavná nezrovnalosť spočíva v jej metodologických obmedzeniach, keďže epidemiologické štúdie uvádzali variabilné výsledky v dôsledku vystavenia elektromagnetickým poliam. Dostupné štúdie naznačujú, že pozorované biologické účinky sú

nekoreluje konzistentne s frekvenciou expozície, trvaním alebo hustotou výkonu. Na základe tu uvedených dôkazov nie je vystavenie RF-EMP v súčasnosti preukázané ako kompletný alebo priamo pôsobiaci genotoxický karcinogén, ktorý môže iniciovať rakovinu poškodením DNA. Experimentálne štúdie však naznačujú, že dlhodobé vystavenie RF-EMP môže spôsobiť oxidačný stres, genomickú nestabilitu a zmenenú génovú expresiu, bunkovú signalizáciu, ktoré môžu byť zapojené do podnecovania a progresie nádoru. RF-EMP možno preto vhodnejšie považovať za potenciálny negenotoxický modulátor karcinogenézy než za priamy iniciátor rakoviny. Súčasné dôkazy však stále nestačia na preukázanie definitívneho vzťahu príčina-účinok.

Okrem toho je potrebné nezávisle analyzovať existujúce dôkazy pre expozície ELF-MF a RF-EMF. Hoci expozícia ELF-MF preukazuje relatívne konzistentnú súvislosť s detskou leukémiou, dôkazy podporujúce karcinogénnu úlohu RF-EMF zostávajú obmedzené a nepresvedčivé. Na overenie výsledkov s väčšou presnosťou a na naznačenie ich účasti na rozvoji rakoviny je potrebná ďalšia štúdia s väčšou vzorkou a presným posúdením expozície.

## Etické vyhlásenie

Neuplatňuje sa.

#### Vyhlásenie o zverejnení informácií

Neexistujú žiadne konflikty záujmov.

#### Generatívne vyhlásenie AI

Autor(i) vyhlasujú, že pri tvorbe tohto rukopisu bola použitá generatívna umelá inteligencia. Na zlepšenie a opravu anglického jazyka (gramatika a pravopis) bola použitá asistencia umelej inteligencie.

#### Financovanie

Autor(i) ďakujú Indickej rade pre lekársky výskum za financovanie. Grant -ID- NHRP/EMF/SYSTEMATIC/RCN/2025.

## Vyhlásenie o autorskom príspevku CrediT

**Mridula Agrahari:**Písanie – pôvodný koncept.**Šruti Gupta:**Písanie – pôvodný koncept.**Gaurav Thákur:**Písanie – pôvodný koncept.**Shweta Tanwarová:**Písanie – recenzia a úprava.**Rohit Gautam:**Konceptualizácia, písanie – recenzia a editácia.**Taruna Arora:**Konceptualizácia, supervízia, písanie – kontrola a editácia.

#### 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

Na výskum opísaný v článku neboli použité žiadne údaje.

## Referencie

[1]Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny, Neionizujúce žiarenie, časť 2: rádiofrekvenčné elektromagnetické polia, in: Monografie IARC o hodnotení karcinogénnych rizík pre ľudí, 102, IARC Press, 2013.
[2] H. Omer, Rádiobiologické účinky a medicínske aplikácie neionizujúceho žiarenia, Saudi J. Biol. Sci. 28 (10) (2021) 5585–5592,https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.071.
[3] M. Havas, Keď sa teória stretne s pozorovaním: môže neionizujúce žiarenie spôsobiť rakovinu? Environ. Pollut. 221 (2017) 501–505,https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.018.
[4] A. Ahlbom, A. Green, L. Kheifets, D. Savitz, A. Swerdlow, Epidemiológia zdravotných účinkov vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu, Environ. Health Perspect. 112 (17) (2004) 1741–1754.https://doi.org/10.1289/ehp.7306.
[5] L. Hardell, C. Sage, Biologické účinky vystavenia elektromagnetickému poľu a normy verejného vystavenia, Biomed. Pharmacother. 62 (2) (2008) 104–109, https://doi.org/10.1016/j.biopha.2007.12.004.
[6] F. Chen, P. Wang, J. Lan, M. Hu, J. Zheng, Y. Li, C. Hou, D. Zhou, Používanie bezdrôtových telefónov a riziko meningiómu u dospelých: systematický prehľad a metaanalýza, Br. J. Neurosurg. 35 (5) (2020) 483–491,https://doi.org/10.1080/ 02688697.2020.1856784.
[7] Y. Zhang, J. Lai, G. Ruan, C. Chen, DW Wang, Metaanalýza elektromagnetických polí extrémne nízkych frekvencií a rizika rakoviny: súhrnná analýza epidemiologických štúdií, Environ. Int. 88 (2016) 36–43,https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.012.
[8] SK Myung, W. Ju, DD McDonnell, YJ Lee, G. Kazinets, CT Cheng, J. M. Moskowitz, Používanie mobilných telefónov a riziko nádorov: metaanalýza, J. Clin. Oncol. 27 (33) (2009) 5565–5572,https://doi.org/10.1200/JCO.2008.21.6366.
[9] VG Khurana, C. Teo, M. Kundi, L. Hardell, M. Carlberg, Mobilné telefóny a mozgové nádory, Surg. Neurol. 72 (3) (2009) 205–214,https://doi.org/10.1016/j.surneu.2009.01.019.
[10] L. Hardell, M. Carlberg, F. Söderqvist, K. Hansson Mild, Metaanalýza dlhodobého používania mobilných telefónov a súvislosti s mozgovými nádormi, Int. J. Oncol. 32 (5) (2008) 1097–1103.https://doi.org/10.3892/ijo.32.5.1097.
[11] P. Kan, SE Simonsen, JL Lyon, JRW Kestle, Používanie mobilných telefónov a nádor na mozgu: metaanalýza, J. Neuro Oncol. 86 (1) (2008) 71–78.https://doi.org/10.1007/s11060-007-9432-1.
[12]Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) klasifikuje rádiofrekvenčné elektromagnetické polia ako potenciálne karcinogénne pre ľudí, Svetová zdravotnícka organizácia, 2011. Tlačová správa č. 208).
[13] AB Miller, LL Morgan, I. Udasin, DL Davis, Aktualizácia epidemiológie rakoviny po hodnotení IARC z roku 2011, Environ. Res. 167 (2018) 673–683.https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.043.
[14]A. Rahman, A. Mishal, MS Jabr, ZI Muhammad, Žiarenie: typy, prírodné zdroje a priemyselné zdroje, Current Clinical and Medical Education 2 (5) (2024) 89–94.
[15] R. Gautam, E. Priyadarshini, JP Nirala, P. Rajamani, Vplyv neionizujúceho elektromagnetického žiarenia na mužskú neplodnosť: posúdenie mechanizmu a dôsledkov, Int. J. Radiat. Biol. 98 (6) (2022) 1063–1073.https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1859154.
[16] M. Malavolti, C. Malagoli, LA Wise, M. Poli, B. Notari, I. Taddei, S. Fabbi a kol., Vystavenie domácností magnetickým poliam z transformátorových staníc a riziko detskej leukémie, Environ. Res. 245 (2024) 118043.https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118043.
[17] C. Brabant, A. Geerinck, C. Beaudart, E. Tirelli, C. Geuzaine, O. Bruyère, Vystavenie magnetickým poliam a detská leukémia: systematický prehľad a metaanalýza prípadovo-kontrolných a kohortových štúdií, Rev. Environ. Health 38 (2) (2023) 229–253. https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0112.
[18] DD Hauri, B. Spycher, A. Huss, F. Zimmermann, M. Grotzer, N. von der Weid, A. Spoerri, CE Kuehni, M. Röösli, Vystavenie rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam z vysielačov a riziko rakoviny u detí: kohortová štúdia založená na sčítaní ľudu, Am. J. Epidemiol. 179 (7) (2014) 843–851,https://doi.org/10.1093/ aje/kwt442.
[19] J. Schüz, A. Ahlbom, Vystavenie elektromagnetickým poliam a detská leukémia, Radiat. Protect. Dosim. 132 (2) (2008) 202–211,https://doi.org/10.1093/rpd/ ncn270.
[20]MH Repacholi, A. Basten, V. Gebski, D. Noonan, J. Finnie, AW Harris, Lymfómy u transgénnych myší Eμ-Pim1 vystavených pulzným 900 MHz elektromagnetickým poliam, Radiat. Res. 147 (5) (1997) 631-640.
[21] B. Hocking, IR Gordon, HL Grain, GE Hatfield, Výskyt a úmrtnosť na rakovinu a blízkosť televíznych veží, Med. J. Aust. 165 (11–12) (1996) 601–605,https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.1996.tb138661.x.
[22] P. Wang, C. Hou, Y. Li, D. Zhou, Používanie bezdrôtových telefónov a riziko gliómu u dospelých, World Neurosurg. 115 (2018) e629–e636,https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.04.122.
[23] L. Leng, Vzťah medzi používaním mobilného telefónu a rizikom vzniku nádoru na mozgu, Chinese Neurosurgical Journal 2 (2016) 6,https://doi.org/10.1186/s41016-016- 0059-y.
[24] YJ Choi, JM Moskowitz, SK Myung, YR Lee, YC Hong, Používanie mobilných telefónov a riziko nádorov: systematický prehľad a metaanalýza, Int. J. Environ. Res. Publ. Health 17 (21) (2020) 8079.https://doi.org/10.3390/ijerph17218079.
[25] M. Feychting, J. Schüz, MB Toledano, R. Vermeulen, A. Auvinen, A. HarboPoulsen, I. Deltour a kol., Používanie mobilných telefónov a riziko vzniku nádoru na mozgu – COSMOS, prospektívna kohortová štúdia, Environ. Int. 185 (2024) 108552.https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108552.
[26] M. Yang, W. Guo, C. Yang, J. Tang, Q. Huang, Používanie mobilných telefónov a riziko gliómu, PLoS One 12 (5) (2017) e0175136,https://doi.org/10.1371/journal. pone.0175136.
[27] Y. Wang, Metaanalýza súvislosti medzi používaním mobilných telefónov a rizikom gliómu, Asian Pac. J. Cancer Prev. APJCP 17 (1) (2016) 298–300,https://doi.org/10.4103/0973-1482.200759.
[28] T. Scarato, Politika USA v oblasti bezdrôtových technológií a ochrany verejného zdravia, Front. Public Health 13 (2025) 1–29,https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1677583.
[29]Medzinárodná telekomunikačná únia (ITU), Usmernenia pre prípravu národných hlavných plánov bezdrôtového širokopásmového pripojenia pre ázijsko-tichomorský región, Medzinárodná telekomunikačná únia, Ženeva, Švajčiarsko, 2013.
[30] VA Leach, I. Yakymenko, GN De Iuliis, GP Chrousos, Komplexný mechanizmus biologických a zdravotných účinkov antropogénnych extrémne nízkych

frekvencia a elektromagnetické polia bezdrôtovej komunikácie, Front. Public Health 13 (2025) 1585441,https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1585441.
[31] JD Hayes, AT Dinkova-Kostova, KD Tew, Oxidačný stres pri rakovine, Cancer Cell 38 (2) (2020) 167–197,https://doi.org/10.1016/j.ccell.2020.06.001.
[32]I. Jakymenko, O. Tsybulin, E. Sidorik, D. Henshel, Oxidačné mechanizmy biologickej aktivity nízkointenzívneho rádiofrekvenčného žiarenia, Electromagn. Biol. Med. 35 (2) (2016) 186–202.
[33] J. Friedman, S. Kraus, Y. Hauptman, Y. Schiff, R. Seger, Mechanizmus krátkodobej aktivácie ERK elektromagnetickými poľami na frekvenciách mobilných telefónov, Biochem. J. (2024), https://doi.org/10.1042/BJ20061653. Predbežné online publikovanie.
[34] J. Kruk, HY Aboul-Enein, Reaktívne formy kyslíka a dusíka v karcinogenéze, Mini Rev. Med. Chem. 17 (7) (2017) 555–564.https://doi.org/10.2174/1389557517666170228115324.
[35] I. Jakymenko, O. Tsybulin, Karcinogénne účinky netepelného vystavenia elektromagnetickým poliam bezdrôtovej komunikácie, in: Biologické účinky elektromagnetických polí, CRC Press, 2022, s. 369–390,https://doi.org/10.1201/9781003201052-12.
[36] GC Jagetia, Genotoxické účinky elektromagnetického poľa vyžarovaného mobilnými telefónmi, Environ. Res. 204 (2022) 113321,https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113321.
[37] C. Sage, E. Burgio, Elektromagnetické polia a epigenetika, Child Dev. 89 (1) (2018) 129–136,https://doi.org/10.1111/cdev.12824.
[38] D. Belpomme, L. Hardell, I. Belyaev, E. Burgio, DO Carpenter, Tepelné a netepelné účinky neionizujúceho žiarenia s nízkou intenzitou na zdravie: medzinárodná perspektíva, Environ. Pollut. 242 (časť A) (2018) 643–658.https://doi.org/ 10.1016/j.envpol.2018.07.019.
[39] S. Dasdag, MZ Akdag, ME Erdal, N. Erdal, Účinky rádiofrekvenčného žiarenia s frekvenciou 2,4 GHz vyžarovaného zo zariadení Wi-Fi na expresiu mikroRNA v mozgovom tkanive, Int. J. Radiat. Biol. 91 (7) (2015) 555–561.https://doi.org/10.3109/ 09553002.2015.1028599.

[40] IY Belyaev, C. Bauréus Koch, O. Terenius, K. Roxström-Lindquist, LO G. Malmgren, WH Sommer, LG Salford, BRR Persson, Vystavenie mozgu potkana mikrovlnám GSM s frekvenciou 915 MHz indukuje zmeny v génovej expresii, ale nie dvojvláknové zlomy DNA ani účinky na konformáciu chromatínu, Bioelectromagnetics 27 (4) (2006) 295–306.https://doi.org/10.1002/bem.20216.
[41] I. Y. Beljajev, E. Markova, L. Hillert, LOG Malmgren, BRR Persson, Mikrovlny z mobilných telefónov UMTS/GSM indukujú dlhotrvajúcu inhibíciu ložísk opravy DNA 53BP1/γ-H2AX v ľudských lymfocytoch, Bioelektromagnetics 30 (2) (2009) 129 – 141,https://doi.org/10.1002/bem.20445.
[42] JC Cantu, JW Butterworth, XG Peralta, JA Payne, I. Echchgadda, Analýza globálnych zmien metylácie DNA v ľudských keratinocytoch bezprostredne po vystavení rádiofrekvenčnému poľu s frekvenciou 900 MHz, Bioelectromagnetics 44 (6) (2023) 427–438.https://doi.org/10.1002/bem.22439.
[43] A. Franczak, EM Drzewiecka, W. Kozłowska, A. Zmijewska, PJ Wydorski, Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické pole (ELF-EMF) indukuje zmeny v epigenetickej regulácii v myometriu – štúdia in vitro, Theriogenology 200 (2023) 136–146.https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.02.005.
[44] A. Colciago, D. Colleoni, V. Melfi, Adaptívna reakcia indukovaná elektromagnetickým poľom v Schwannových bunkách prostredníctvom metylácie DNA, deacetylácie histónov a oxidačného stresu, J. Cell. Physiol. (2024),https://doi.org/10.1002/jcp.31365.
[45] M. Barati, B. Darvishi, M. Amin, A. Javidi, SP Shariatpanahi, R. Eisavand, A. Madjid, Bunková stresová reakcia na extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické polia (ELF-EMF): vysvetlenie kontroverzných účinkov ELF-EMF na apoptózu, Cell Prolif. 54 (3) (2021) e13154,https://doi.org/10.1111/cpr.13154.
[46] PJ Wydorski, A. Zmijewska, A. Franczak, Účinky extrémne nízkofrekvenčného elektromagnetického poľa v endometriu ošípaných, Int. J. Mol. Sci. 25 (13) (2024) 6931,https://doi.org/10.3390/ijms25136931.
[47] S. Gupta, RS Sharma, R. Singh, Neionizujúce žiarenie ako možný karcinogén, Int. J. Environ. Health Res. 32 (8) (2022) 1705–1717,https://doi.org/10.1080/09603123.2020.1806212.
[48] S. Wingert, FB Thalheimer, N. Haetscher, M. Rehage, T. Schroeder, MA Rieger, gén GADD45A pre reakciu na poškodenie DNA indukuje diferenciáciu v hematopoetických kmeňových bunkách bez inhibície bunkového cyklu alebo prežitia, Stem Cell. 34 (3) (2016) 699–710,https://doi.org/10.1002/stem.2282.
[49] C. Malagoli, M. Malavolti, LA Wise, E. Balboni, S. Fabbi, S. Teggi, G. Palazzi a kol., Vystavenie domácností magnetickým poliam z vysokonapäťových elektrických vedení a riziko detskej leukémie, Environ. Res. 232 (2023) 116320.https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116320.
[50] M. Malavolti, C. Malagoli, T. Filippini, LA Wise, A. Bellelli, G. Palazzi, M. Cellini a kol., Blízkosť čerpacích staníc v obytných zónach a riziko detskej leukémie, Eur. J. Epidemiol. 38 (7) (2023) 771–782,https://doi.org/10.1007/s10654-023-01009-0.
[51] J.-A. Schmidt, S. Hornhardt, F. Erdmann, I. Sánchez-García, U. Fischer, J. Schüz, G. Ziegelberger, Rizikové faktory detskej leukémie, Front. Public Health 9 (2021) 805757,https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.805757.
[52]H. Guo, L. Kang, W. Qin, Y. Li, Expozícia elektromagnetickému žiareniu a detská leukémia: Metaanalýza a systematický prehľad, Alternative Ther. Health Med. 29 (4) (2023) 56–64.
[53] L. Kheifets, A. Ahlbom, CM Crespi, M. Feychting, C. Johansen, J. Monroe, MF G. Murphy a kol., Súhrnná analýza extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí a detských mozgových nádorov, Am. J. Epidemiol. 172 (7) (2010) 752–761.https://doi.org/10.1093/aje/kwq181.
[54] FM Onyije, A. Olsson, D. Baaken, F. Erdmann, M. Stanulla, D. Wollschläger, J. Schüz, Environmentálne rizikové faktory pre akútnu lymfoblastickú leukémiu u detí, Cancers 14 (2) (2022) 382,https://doi.org/10.3390/cancers14020382.
[55] CM Crespi, XP Vergara, C. Hooper, S. Oksuzyan, S. Wu, M. Cockburn, Detská leukémia a vzdialenosť od elektrického vedenia v Kalifornii: prípadovo-kontrolná štúdia na základe populácie, Br. J. Cancer 115 (1) (2016) 122–128,https://doi.org/10.1038/ bjc.2016.142.

[56] P. Elliott, MB Toledano, J. Bennett, L. Beale, K. de Hoogh, N. Best, DJ Briggs, Základňové stanice mobilných telefónov a rakovina v ranom detstve: prípadová kontrolná štúdia, BMJ 340 (2010) c3077.https://doi.org/10.1136/bmj.c3077.
[57] K. Karipidis, D. Baaken, T. Loney, M. Blettner, C. Brzozek, M. Elwood, M. Silva a kol., Vplyv vystavenia rádiofrekvenčným poliam na riziko rakoviny u bežnej a pracujúcej populácie: systematický prehľad, Environ. Int. 185 (2024) 108983. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108983.
[58] C. Carles, Y. Esquirol, M. Turuban, C. Piel, L. Migault, C. Pouchieu, G. Bouvier, P. Fabbro-Peray, P. Lebailly, I. Baldi, Blízkosť obytných budov k elektrickému vedeniu a riziko vzniku nádoru na mozgu u bežnej populácie, Environ. Res. 185 (2020) 109473. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473.
[59] KJ Johnson, J. Cullen, JS Barnholtz-Sloan, QT Ostrom, CE Langer, M. C. Turner, Epidemiológia detských mozgových nádorov: prehľad konzorcia pre epidemiológiu mozgových nádorov, Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev. 23 (12) (2014) 2716–2736,https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-14-0207.
[60] P. Li, J. McLaughlin, Vystavenie matky extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam v práci a riziko rakoviny mozgu u potomstva, Príčiny rakoviny & Kontrola 20 (6) (2009) 945–955,https://doi.org/10.1007/s10552-009-9311-5.
[61] S. Ivancsits, E. Diem, O. Jahn, HW Rüdiger, Indukcia zlomov vlákna DNA prerušovaným vystavením extrémne nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam v ľudských diploidných fibroblastoch, Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis 519 (1–2) (2002) 1–13,https://doi.org/10.1016/S1383-5718(02) 00109-2.

[62] D. Leszczynski, S. Joenväärä, J. Reivinen, R. Kuokka, Netepelná aktivácia stresovej dráhy Hsp27/p38MAPK žiarením mobilného telefónu v ľudských endotelových bunkách, Diferenciácia 70 (2–3) (2002) 120–129,https://doi.org/10.1046/j.1432-0436.2002.700207.x.
[63] H. Nittby, LG Salford, A. Brun, J. Eberhardt, L. Malmgren, BRR Persson, Zvýšená permeabilita hematoencefalickej bariéry v mozgu cicavcov, Pathophysiology 16 (2–3) (2009) 103–112.https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.01.001.
[64] M. Prasad, P. Kathuria, P. Nair, A. Kumar, Používanie mobilných telefónov a riziko vzniku mozgových nádorov, Neurol. Sci. 38 (2020) 797–810,https://doi.org/10.1007/s10072-017-2850-8.
[65] A. Bortkiewicz, E. Gadzicka, W. Szymczak, Používanie mobilných telefónov a riziko vzniku intrakraniálnych nádorov a nádorov slinných žliaz, Int. J. Occup. Med. Environ. Health 30 (1) (2017) 27–43.https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00802.
[66]AG Levis, N. Minicuci, P. Ricci, V. Gennaro, S. Garbisa, Mobilné telefóny a nádory hlavy: nezrovnalosti v epidemiologických štúdiách, Environ. Health 10 (2011) 59.
[67] L. Hardell, M. Carlberg, K. Hansson Mild, Opätovná analýza rizika gliómu vo vzťahu k používaniu mobilného telefónu: Porovnanie s výsledkami medzinárodnej prípadovo-kontrolnej štúdie Interphone, Int. J. Epidemiol. 40 (4) (2011) 1126–1128. https://doi.org/10.1093/ije/dyq246.
[68] G. Coureau, G. Bouvier, P. Lebailly, P. Fabbro-Peray, A. Gruber, K. Leffondre, J.-S. Guillamo a kol., Používanie mobilných telefónov a mozgové nádory v prípadovo-kontrolnej štúdii CERENAT, Occup. Environ. Med. 71 (7) (2014) 514–522.https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101754.
[69] J. Moon, J. Kwon, Y. Mun, Vzťah medzi rádiofrekvenčným žiarením z mobilných telefónov a nádorom na mozgu, Environ. Health 23 (2024) 82,https://doi.org/10.1186/s12940-024-00982-1.
[70] Študijná skupina INTERPHONE, Riziko nádoru mozgu vo vzťahu k používaniu mobilného telefónu: výsledky medzinárodnej prípadovo-kontrolnej štúdie INTERPHONE, Int. J. Epidemiol. 39 (3) (2010) 675–694.https://doi.org/10.1093/ije/dyq079.
[71] MJ Schoemaker, HC Christensen, A. Lahkola, T. Salminen, J. Raitanen, S. Heinää, AJ Swerdlow, T. Tynes, A. Auvinen, Meningiom a používanie mobilných telefónov, Int. J. Epidemiol. 37 (6) (2008) 1304 – 1312,https://doi.org/10.1093/ije/ dyn155.

[72] E. Cardis, BK Armstrong, JD Bowman, GG Giles, M. Hours, D. Krewski, M. McBride a kol., Riziko mozgových nádorov vo vzťahu k odhadovanej dávke rádiofrekvenčného žiarenia z mobilných telefónov: výsledky z piatich krajín zapojených do Interphone, Occup. Environ. Med. 68 (9) (2011) 631–640.https://doi.org/10.1136/oemed-2011-100155.
[73] P. Frei, AH Poulsen, C. Johansen, M. Steding-Jessen, J. Schüz, Dánska kohortová študijná skupina, Používanie mobilných telefónov a riziko vzniku mozgových nádorov: aktualizácia dánskej kohortovej štúdie, BMJ 343 (2011) d6387.https://doi.org/10.1136/bmj.d6387.
[74] T. Takebayashi, S. Akiba, Y. Kikuchi, M. Taki, K. Wake, S. Watanabe, N. Yamaguchi, Používanie mobilných telefónov a riziko nádoru na mozgu, Br. J. Cancer 98 (3) (2008) 652–659,https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6604214.
[75] VS Benson, K. Pirie, J. Schüz, GK Reeves, V. Beral, Používanie mobilných telefónov a riziko vzniku mozgových nádorov a iných druhov rakoviny: prospektívna štúdia, Int. J. Epidemiol. 42 (3) (2013) 792–802.https://doi.org/10.1093/ije/dyt072.
[76] I. Deltour, C. Johansen, A. Auvinen, M. Feychting, L. Klaeboe, J. Schüz, Časové trendy vo výskyte mozgových nádorov v Dánsku, Fínsku, Nórsku a Švédsku v rokoch 1974 – 2003, J. Natl. Cancer Inst. 101 (24) (2009) 1721 – 1724.https://doi.org/ 10.1093/jnci/djp415.
[77] S. Lönn, Používanie mobilných telefónov a riziko akustickej neuromy, Epidemiology 15 (6) (2004) 653–659,https://doi.org/10.1097/01.ede.0000142519.00772.bf.
[78] MJ Schoemaker, AJ Swerdlow, A. Ahlbom, A. Auvinen, KG Blaasaas, E. Cardis, HC Christensen a kol., Používanie mobilných telefónov a riziko akustického neurómu, Br. J. Cancer 93 (2005) 842–848.https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6602764.
[79] T. Takebayashi, N. Varsier, Y. Kikuchi, K. Wake, M. Taki, S. Watanabe, S. Akiba, N. Yamaguchi, Používanie mobilných telefónov a riziko akustickej neuromy, Occup. Environ. Med. 63 (12) (2006) 802–807,https://doi.org/10.1136/oem.2006.028308.

[80] D. Pettersson, Dlhodobé používanie mobilných telefónov a riziko akustickej neuromy, Epidemiology 25 (2) (2014) 233–241,https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000058.
[81] YW Shih, CS Hung, CC Huang, KR Chou, SF Niu, S. Chan, HT Tsai, Používanie smartfónov a riziko rakoviny prsníka, Cancer Manag. Res. 12 (2020) 10799–10807.https://doi.org/10.2147/CMAR.S267415.
[82] SAR Mortazavi, S. Tahmasebi, JC Lech, JS Welsh, A. Taleie, A. Rezaianzadeh, A. Zamani a kol., Čas strávený pred digitálnou obrazovkou a riziko rakoviny prsníka u žien, Journal of Biomedical Physics and Engineering 14 (2) (2024) 169–182.https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2310-1678.
[83] D. Aydin, M. Feychting, J. Schüz, T. Tynes, TV Andersen, LS Schmidt, A. H. Poulsen a kol., Používanie mobilných telefónov a mozgové nádory u detí a dospievajúcich: multicentrická prípadovo-kontrolná štúdia, J. Natl. Cancer Inst. 103 (16) (2011) 1264–1276. https://doi.org/10.1093/jnci/djr244.
[84] L. Kheifets, CM Crespi, C. Hooper, M. Cockburn, AT Amoon, XP Vergara, Vystavenie magnetickým poliam v domácnostiach a detská leukémia, Cancer Causes & Control 28 (10) (2017) 1117–1123.https://doi.org/10.1007/s10552-017-0951-6.
[85] J. Vila, MC Turner, E. Gracia-Lavedan, J. Figuerola, JD Bowman, L. Kincl, L. Richardson a kol., Vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam na pracovisku, Environ. Int. 119 (2018) 353–365.https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.038.
[86] MH Wang, KW Chen, DX Ni, HJ Fang, LS Jang, CH Chen, Vplyv extrémne nízkofrekvenčných parametrov elektromagnetického poľa na bunky rakoviny prsníka, Electromagn. Biol. Med. 40 (3) (2021) 384–392.https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1891093.
[87] L. Falcioni, L. Bua, E. Tibaldi, M. Lauriola, L. De Angelis, F. Gnudi, D. Mandrioli a kol., Správa o konečných výsledkoch týkajúcich sa nádorov mozgu a srdca u potkanov kmeňa Sprague-Dawley vystavených od prenatálneho života až do prirodzenej smrti rádiofrekvenčnému poľu mobilného telefónu, ktoré je reprezentatívne pre environmentálne vyžarovanie základňovej stanice GSM s frekvenciou 1,8 GHz, Environ. Rez. 165 (2018) 496 – 503,https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.037.
[88] A. Lerchl, M. Klose, K. Grote, AFX Wilhelm, O. Spathmann, T. Fiedler, J. Streckert, V. Hansen, M. Clemens, Podpora vzniku nádorov vystavením rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam pod limitmi expozície pre ľudí, Biochem. Biophys. Res. Commun. 459 (4) (2015) 585–590.https://doi.org/10.1016/j. bbrc.2015.02.151.
[89] Národný toxikologický program, Toxikologické a karcinogenézne štúdie na potkanoch Sprague Dawley vystavených celotelovému rádiofrekvenčnému žiareniu.https://doi.org/10.22427/NTP-TR-595, 2018.
[90] Národný toxikologický program, Toxikologické a karcinogenézne štúdie u myší B6C3F1/N vystavených celotelovému rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou (1 900 MHz) a modulácie (GSM a CDMA) používané mobilnými telefónmi, Natl. Toxicol. Progr. Tech. Rep. 596 (2018),https://doi.org/10.22427/NTP-TR-596NTP-TR.