Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

applied sciences

MDPI

Recenzia

Naratívny prehľad o vplyve elektromagnetických polí pod 100 kHz na endokrinný systém

Piotr M. Tojza[1,2] Grzegorz Redlarski[1,2] Leszek S. Litzbarski[2,3] a Mieszko Czaplinski[2,4,*]

1 Fakulta elektrotechniky a riadiacej techniky, Technická univerzita v Gdansku, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdaňsk, Poľsko; piotr.tojza@pg.edu.pl (PMT)
2 Fahrenheitova únia univerzít, Gdansk Zwyciestwa Ave. 27, 80-219 Gdaňsk, Poľsko; leszek.litzbarski@pg.edu.pl
3 Fakulta aplikovanej fyziky a matematiky, Technická univerzita v Gdansku, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdaňsk, Poľsko
4 Univerzitné klinické centrum, Lekárska univerzita v Gdansku, Debinki 7, 80-952 Gdaňsk, Poľsko
* Korešpondencia: 194058@uck.gda.pl ; Tel.: +48-785-550-004

Odporúčaná aplikácia

Hoci je náš článok prehľadom, prináša mnoho dôležitých myšlienok na ďalšie zváženie. Vzhľadom na všadeprítomnosť nízkofrekvenčných elektromagnetických polí v každodennom ľudskom prostredí je vystavenie im do značnej miery nevyhnutné. Ich biologické účinky stále nie sú úplne pochopené. Táto práca analyzuje vzťah medzi nízkofrekvenčnými elektromagnetickými poľami a ľudským endokrinným systémom. Keďže endokrinný systém je zodpovedný za reguláciu a udržiavanie ľudského tela, jeho potenciálna dysregulácia môže viesť k významným nepriaznivým účinkom na zdravie. Tento rukopis sumarizuje existujúce štúdie zaoberajúce sa touto témou a zdôrazňuje niekoľko sľubných smerov pre budúci výskum.

Abstrakt

Podklad: Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické polia (ELF-EMF), generované najmä energetickou infraštruktúrou a domácimi spotrebičmi, vzbudili vedecký záujem kvôli ich potenciálnemu vplyvu na endokrinný systém. Výskum na zvieratách opakovane ukazuje účinky na sekréciu melatonínu, hladiny stresových hormónov, aktivitu štítnej žľazy a reprodukčnú funkciu – do značnej miery sprostredkované oxidačným stresom a nerovnováhou vápnikových iónov. Naproti tomu štúdie na ľuďoch zostávajú nekonzistentné a často sú brzdené metodologickými obmedzeniami a nedostatočnou charakterizáciou expozície. Cieľ: Táto recenzia syntetizuje experimentálne a epidemiologické štúdie skúmajúce expozíciu nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam (≤100 kHz) a jeho vplyv na hormonálnu reguláciu. Metódy: Bibliometrická analýza zdôrazňuje sústredený záujem na špecifické endokrinné ciele, najmä na epifýzu. Dôležité je, že mnohé experimentálne štúdie používajú intenzity polí vyššie ako tie, ktoré sa nachádzajú v blízkosti vysokonapäťových vedení, čo obmedzuje priamu použiteľnosť. Závery: Hoci definitívna kauzálna súvislosť nebola stanovená, rozsiahle vystavenie nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam odôvodňuje preventívne opatrenia. Pretrváva niekoľko dôležitých medzier vo výskume, z ktorých mnohé sú identifikované v tomto prehľade. Téma účinkov nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na endokrinný systém si vyžaduje dôkladnejšie, dlhodobé štúdie na ľuďoch s presným posúdením expozície.

Kľúčové slová: elektromagnetické pole; endokrinný systém; hormóny; rakovina; vystavenie elektromagnetickým poliam

Check for updates

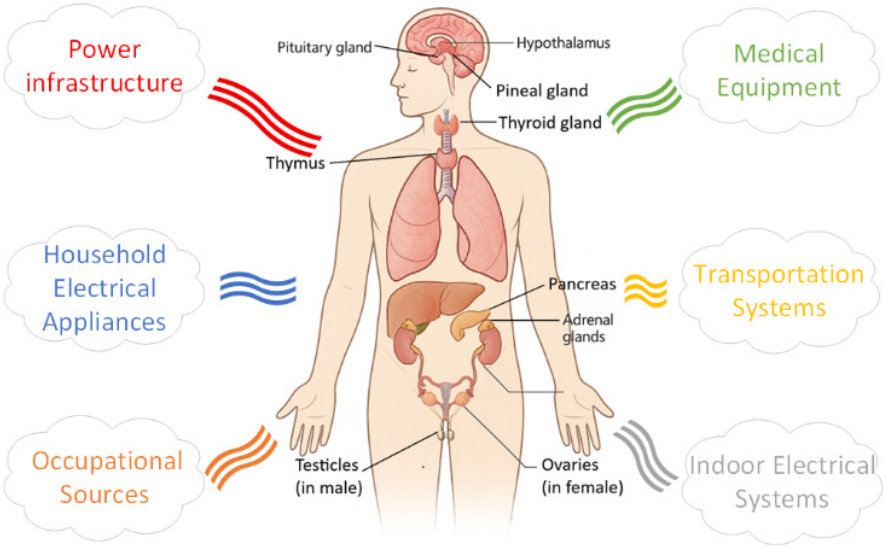
Akademický redaktor: Lorenzo Manti

Prijaté: 24. marca 2026
Revidované: 8. mája 2026
Schválené: 11. mája 2026
Publikované: 14. mája 2026

Autorské práva: © 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, Švajčiarsko. Tento článok je článok s otvoreným prístupom. d. e distribuované podľa zmluvných podmienok Kreatívna komunikácia na Licencia Attribution (CC BY).

1. Úvod

Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické polia (ELF-EMF) sú typom neionizujúceho žiarenia, ktoré sa typicky spája s nízkofrekvenčnými elektrickými systémami. Treba však poznamenať, že definícia frekvenčných rozsahov sa líši v závislosti od prijatého klasifikačného rámca. V tejto štúdii sa terminológia riadi klasifikáciou navrhnutou ICNIRP a analýza zahŕňa elektromagnetické polia s frekvenciami pod 100 kHz, vrátane rozsahu ELF aj susedných zložiek s veľmi nízkou frekvenciou (VLF) [1]. Tieto polia sa vyznačujú dlhými vlnovými dĺžkami a nízkou energiou fotónov. Medzi najčastejšie zdroje takýchto elektromagnetických polí patria vedenia na prenos a rozvod energie, elektrické rozvodne, domáce rozvody a spotrebiče, ako sú chladničky, fény a indukčné varné dosky. Pracovné prostredie môže predstavovať vyššie úrovne expozície, najmä v blízkosti zváracích zariadení alebo veľkých elektromotorov. Hoci sa všeobecne považujú za bezpečné pri nízkych intenzitách, prebiehajúci výskum skúma potenciálne biologické účinky dlhodobého vystavenia nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam. Vzhľadom na svoju neionizujúcu povahu tieto polia nemajú dostatočnú energiu na uvoľnenie elektrónov z atómových obežných dráh alebo na priame narušenie molekulárnych väzieb v biologických tkanivách [2]. Ich biologické účinky sa preto nepripisujú priamej ionizácii, ale skôr jemnejším interakčným mechanizmom [3]. Rozšírená prítomnosť nízkofrekvenčných elektromagnetických polí z viacerých zdrojov v modernej spoločnosti znamená, že ľudia sú im v každodennom živote neustále vystavení [2] (pozri obrázok1). Všadeprítomná a často nepostrehnuteľná prítomnosť týchto polí naznačuje, že môžu predstavovať pretrvávajúci environmentálny faktor nízkej úrovne. Nepretržitá expozícia, a to aj pri miernej intenzite, môže klásť chronické adaptačné požiadavky na biologické systémy, čo môže viesť k posunom fyziologických základných hodnôt alebo „nastavovacích bodov“ počas dlhšieho časového obdobia [4Táto perspektíva presúva pozornosť z akútnych, vysoko intenzívnych účinkov na dlhodobú, nízkoúrovňovú „expozíciu pozadia“, ktorá je charakteristická pre moderné prostredie, čo naznačuje jemný, ale potenciálne významný vplyv na fyziologickú homeostázu.



Obrázok 1. Schematické znázornenie potenciálneho vplyvu rôznych zdrojov extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí (ELF-EMF) na ľudský endokrinný systém; autorské práva L. Litzbarski.

Endokrinný systém je rozsiahla sieť žliaz vrátane hypofýzy, štítnej žľazy a prištítnych teliesok, nadobličiek, epifýzy, hypofýzy a pohlavných žliaz, ktoré produkujú a vylučujú hormóny priamo do krvného obehu [5Ďalšou súčasťou tohto systému sú rôzne sekrečné bunky, ktoré sú rozptýlené po tele. Príkladmi takýchto buniek sú bunky pankreatických ostrovčekov (α, β a δ), ktoré vylučujú glukagón, inzulín a somatostatín.

systém vychytávania a dekarboxylácie prekurzorov amínov s rôznymi gastrointestinálnymi hormónmi (gastrín, sekretín a cholecystokinín) alebo paragangliové bunky, ktoré vylučujú adrenalín (ich funkcia je podobná funkcii drene nadobličiek, ktorá tiež vylučuje adrenalín; kôra nadobličiek namiesto toho vylučuje steroidné hormóny); hoci nepredstavujú samostatné orgány, majú obrovský význam. Hormonálna aktivita prebieha aj v obličkách (erytropoetín) a v týmuse (tymopoetín) – tieto hormóny sú zodpovedné za hematopoézu (t. j. tvorbu nových červených a bielych krviniek).

Hormóny pôsobia ako chemickí poslovia, ktorí regulujú množstvo základných telesných funkcií, ako je metabolizmus, rast, vývoj, reprodukcia a kľúčová stresová reakcia [4Systém funguje prostredníctvom komplexných spätnoväzobných slučiek, ktorých príkladom je os hypotalamus-hypofýza-nadobličky (HPA), ktorá reguluje stresové reakcie, a os hypotalamus-hypofýza-štítna žľaza (HPT), ktorá riadi metabolizmus a vývoj [6]. Poruchy na akejkoľvek úrovni týchto prepojených dráh sa môžu kaskádovito šíriť, čo vedie k rozsiahlym fyziologickým poruchám; v skutočnosti väčšina endokrinných ochorení zahŕňa dysreguláciu týchto spätnoväzobných slučiek. Regulačné systémy vrátane nervového systému a endokrinného systému vykazujú vysoký stupeň citlivosti na vonkajšie faktory prostredia, napr. ENF-EMF [7]. Vrodená citlivosť endokrinného systému v kombinácii s jeho úlohou pri sprostredkovaní stresových reakcií a udržiavaní homeostázy z neho robí hlavného kandidáta na prejavovanie jemných, ale významných biologických reakcií na environmentálne poruchy, ako sú ELF-EMP. Jeho schopnosť prispôsobiť sa a reagovať na vnútorné a vonkajšie podnety prostredníctvom presnej hormonálnej regulácie znamená, že aj malé poruchy môžu byť skorými indikátormi biologických účinkov environmentálnych faktorov. Preto štúdium tohto systému (a najmä interakcií hormónov a receptorov), pretože sa považujú za nevyhnutné pre pochopenie účinkov ELF na celý endokrinný systém [7]) poskytuje cenný pohľad na adaptívne a potenciálne maladaptívne reakcie tela na chronické alebo akútne vystavenie ELF-EMF.

Primárnym cieľom tejto recenzie je preskúmať súčasný stav poznatkov o účinkoch ELF-EMF na endokrinný systém a identifikovať medzery vo výskume, ktoré podporujú ďalší výskum a môžu priniesť potenciálne využitie v praxi pri prevencii poškodenia ľudského tela súvisiaceho s ELF. Na posilnenie vedeckej presnosti tejto recenzie bola tradičná analýza literatúry doplnená bibliometrickou štúdiou zameranou na identifikáciu kľúčových trendov a vplyvných prác v tejto oblasti. Na tento účel boli údaje získané a analyzované z databáz Web of Science (WoS) a Scopus. Tieto databázy boli vybrané kvôli ich širokému pokrytiu rôznych oblastí vedy – zahŕňajú zdravotnícke aj technické záznamy s významným množstvom článkov o fyzike a technológii; keďže téma našej recenzie prekračuje tradičné hranice medzi vedeckými oblasťami, vyžaduje si preskúmanie zdrojov z rôznych oblastí vedy. Tento kombinovaný prístup zvyšuje hĺbku a spoľahlivosť recenzie rozšírením pokrytia literatúry, minimalizáciou publikačného skreslenia, zlepšením sledovania citácií a zabezpečením komplexnejšej a multidisciplinárnej perspektívy.

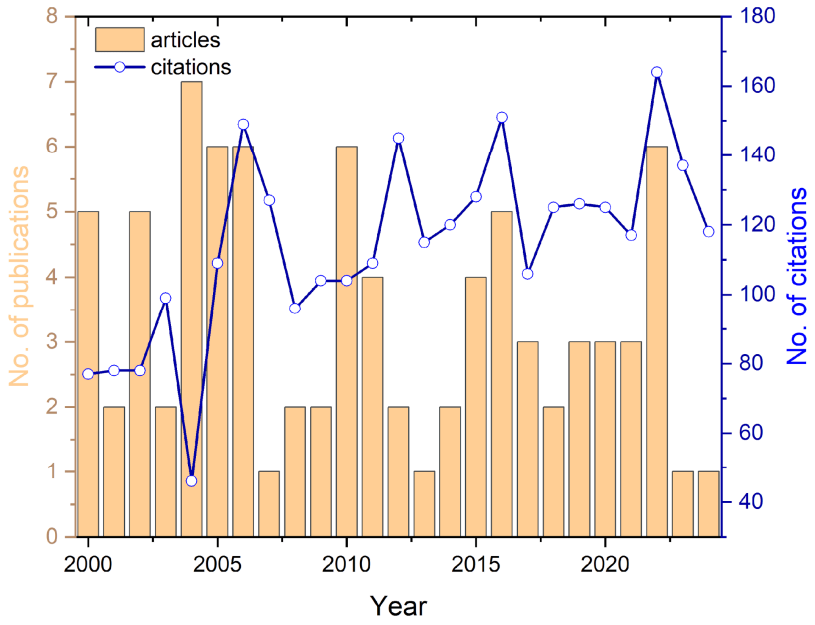
2. Bibliometrická analýza

V databázach Web of Science (WoS) a Scopus sa vyhľadávalo pomocou nasledujúceho dopytu:

TS = ((Extrémne nízka frekvencia) ALEBO (ELF)) A ((Elektromagnetické pole) ALEBO (EMF) ALEBO (magnetické pole) ALEBO (elektrické pole)) A ((endokrinný systém) ALEBO (štítna žľaza) ALEBO (šišica) ALEBO (os HPA) ALEBO (pohlavné žľazy) ALEBO (hypofýza)).

Počiatočné vyhľadávanie prinieslo 134 záznamov z WoS a 129 zo Scopus. Po odstránení duplikátov pomocou Rayyan [8], webový nástroj na správu systematických prehľadov, bol zostávajúci súbor údajov prekontrolovaný a spresnený, čo viedlo k 178 jedinečným záznamom [9Z nich

Pôvodné výskumné články tvorili 80,6 %, zatiaľ čo prehľadové články a zborníky z konferencií tvorili 9,3 %, respektíve 7,8 %. Zvyšok tvorili kapitoly z kníh a redakčné poznámky. Obrázok2ilustruje ročný trend v počte publikácií a citácií týkajúcich sa vplyvu ENF-EMF na endokrinný systém. Za posledných 25 rokov záujem o túto tému kolísal, ale pretrvával. Hoci počet nových publikácií na túto tému v posledných rokoch klesol, miera citácií zostala konzistentne vysoká a presahovala 110 citácií ročne, čo naznačuje pretrvávajúcu relevantnosť a záujem vedeckej komunity.



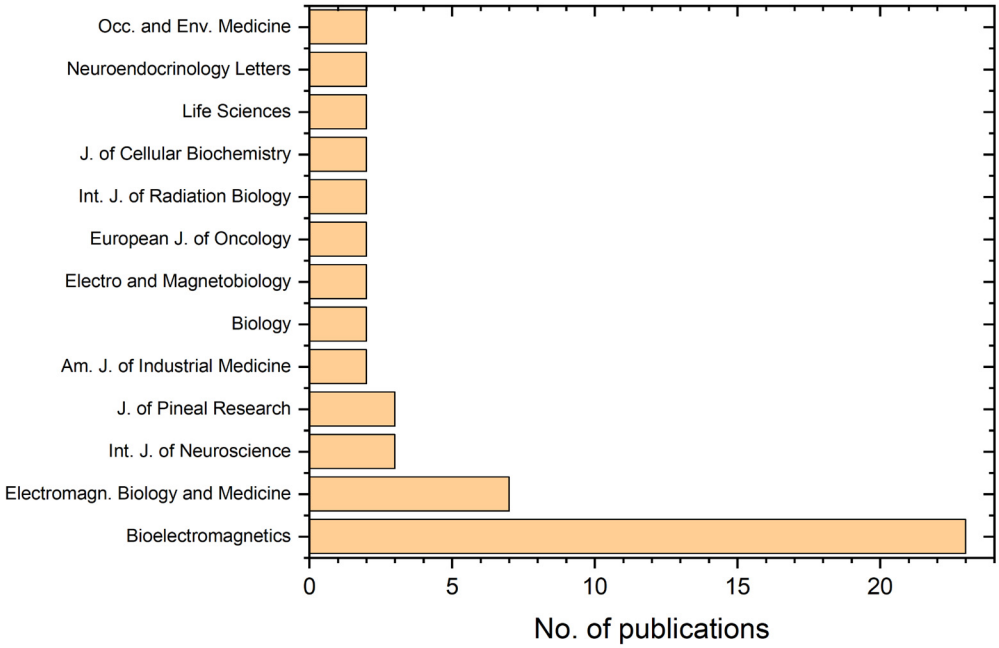
Obrázok 2. Ročný vývoj počtu publikácií a citácií súvisiacich s vplyvom ENF-EMF na endokrinný systém.

Analýza metadát vybraných článkov odhalila, že výskum účinkov ENF-EMF na endokrinný systém bol publikovaný prevažne v špecializovaných časopisoch zameraných na bioelektromagnetiku, ako napríklad*Bioelektromagnetika*a*Elektromagnetická biológia a medicína*Naproti tomu články zaoberajúce sa touto témou sa objavovali oveľa menej často v mainstreamových lekárskych časopisoch. Tento publikačný model naznačuje, že táto téma zostáva primárne v doméne interdisciplinárnych alebo špecializovaných vedeckých komunít, a nie je široko integrovaná do konvenčného diskurzu o lekárskom výskume (pozri obrázok3).

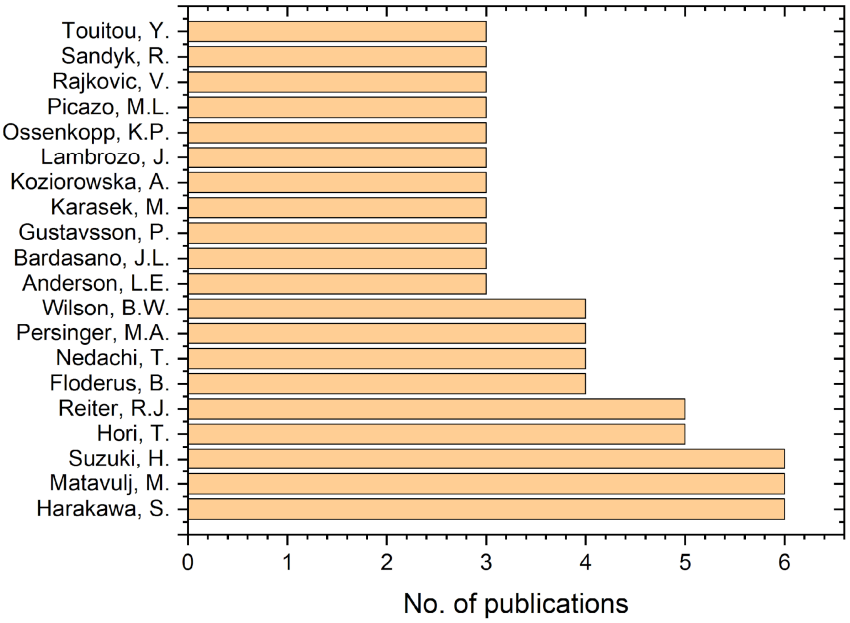
Najproduktívnejšími autormi v tejto oblasti sú Shinji Harakawa z Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine v Japonsku, Milan Matavulj (Matavuly) z Univerzity v Novom Sade v Srbsku a Hiromichi Suzuki zamestnaný v Národnom onkologickom centre v Japonsku. Analýza vedeckých profilov popredných autorov v databáze Scopus naznačuje, že ich primárne výskumné záujmy ležia v oblastiach biochémie a medicíny, čo sú oblasti úzko prepojené so štúdiom vplyvu elektromagnetických polí na biologické systémy. Okrem toho títo výskumníci pracujú s renomovanými inštitúciami známymi svojou špecializáciou na lekárske a biologické vedy. Ďalšie informácie o ďalších významných prispievateľoch do oblasti výskumu ELF-EMF v súvislosti s endokrinným systémom sú uvedené na obrázku.4.

Na základe metadát, ako sú názvy, abstrakty a kľúčové slová, databáza WoS kategorizuje články do špecifických tematických oblastí výskumu. Ako je znázornené na obrázku5Väčšina publikácií zaoberajúcich sa vplyvom ENF-EMF na endokrinný systém bola zaradená do oblastí súvisiacich s biológiou a biofyzikou. Naproti tomu výrazne menší podiel článkov bol zaradený do oblastí ako medicína a inžinierstvo.

Distribúcia zdôrazňuje prevažne biologické zameranie súčasného výskumu v tejto oblasti s relatívne obmedzenou integráciou do klinických alebo technických disciplín.



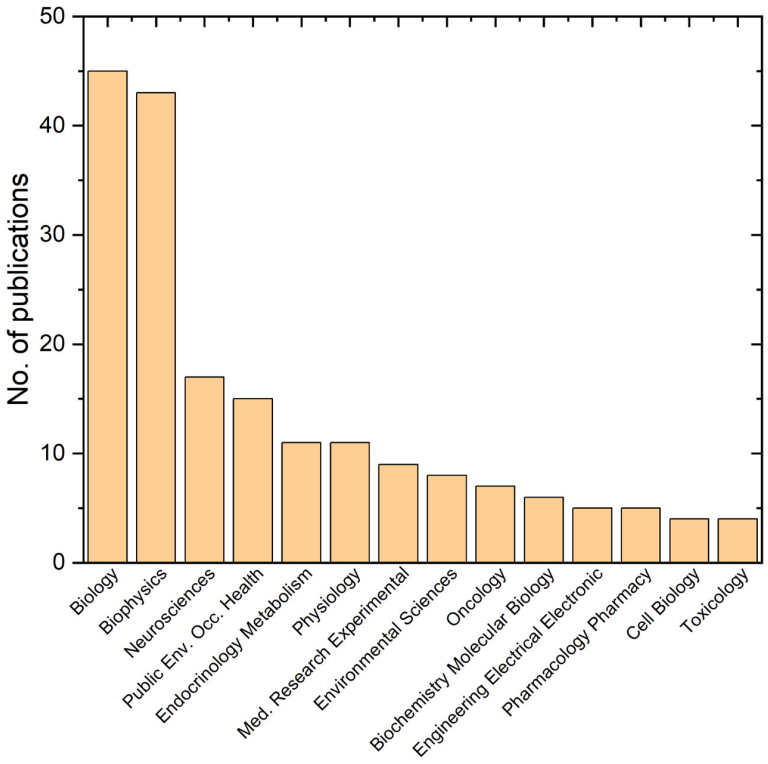
Obrázok 3. Najrelevantnejšie časopisy na publikovanie v oblasti vplyvu ELF-EMF na endokrinný systém.



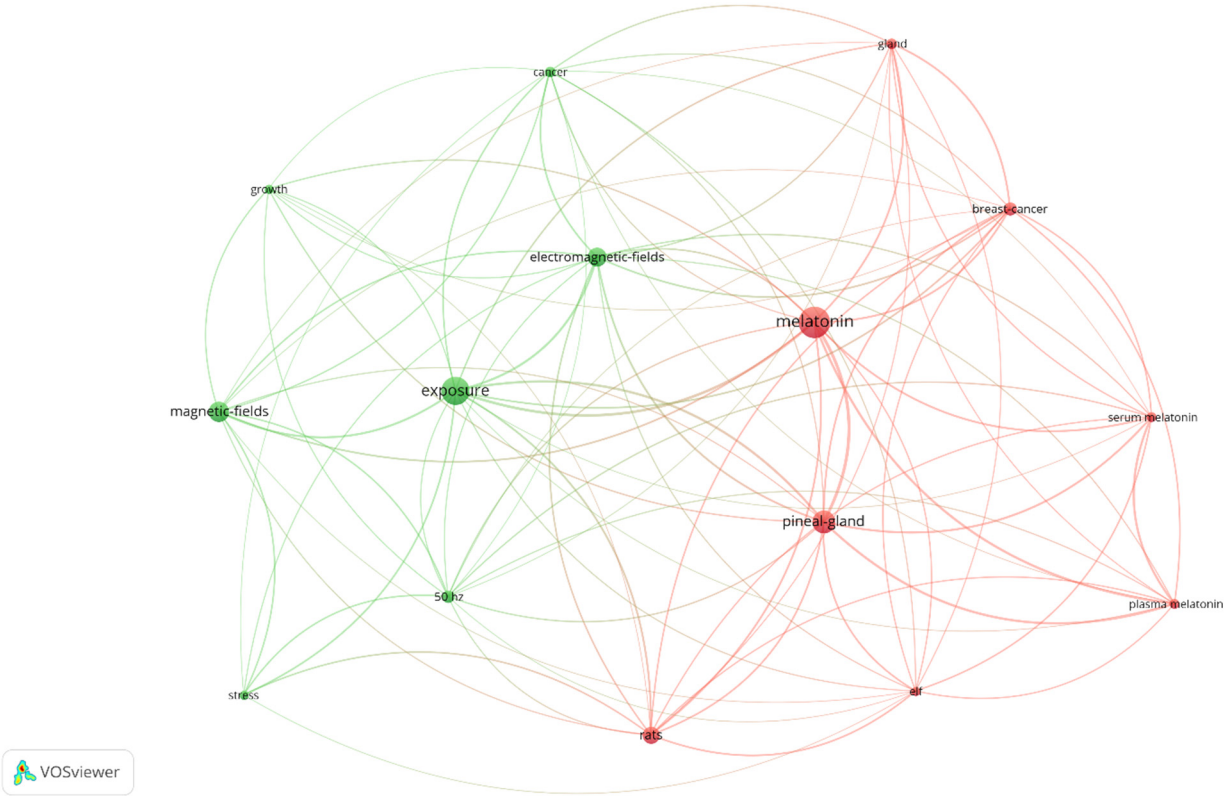
Obrázok 4. Najproduktívnejší autori v oblasti vplyvu ELF-EMF na endokrinný systém.

Obrázok6predstavuje sieť spoločného výskytu kľúčových slov, ktorá ilustruje vzťahy medzi často používanými výrazmi v analyzovaných publikáciách. Analýza bola vykonaná pomocou softvéru VOS viewer [10], pričom sa použil prah spoločného výskytu aspoň 10 výskytov, aby sa zabezpečila relevantnosť a sila asociácií. Vzhľadom na vysoký počet opakovaní terminológie súvisiacej s EMF bol stanovený relatívne vysoký prah, aby sa zamerali na výraznejšie vzorce. Výsledná vizualizácia ukazuje, že kľúčové slová „expozícia“, „šišinka mozgová“ a „melatonín“ sa vyskytovali najčastejšie a boli úzko spojené s výrazmi ako „elektromagnetické polia“ a „magnetické polia“. Okrem toho sa výraz „potkany“ vyskytoval s pozoruhodnou frekvenciou, čo naznačuje, že podstatná časť štúdií zahŕňala zvieracie modely. Táto analýza kľúčových slov zdôrazňuje prevládajúce zameranie výskumu na melatonín-

súvisiace výsledky a experimentálne štúdie na zvieratách v oblasti účinkov ENF-EMF na endokrinný systém.



Obrázok 5. Najpopulárnejšie témy WoS v oblasti vplyvu ELF-EMF na endokrinný systém.



Obrázok 6. Spoločný výskyt kľúčových slov (minimálne 10 výskytov) – Obrázok vygenerovaný vo VOSvieweri (verzia 1.6.20) [10].

3. Vplyv EMF na hormóny a žľazy

Vedecké štúdie o účinkoch ENF-EMF na endokrinný systém preukázali rôzne účinky na rôzne žľazy a s nimi spojené hormóny. Hoci štúdie na zvieratách poskytujú konzistentnejší obraz, epidemiologické údaje od ľudí často vykazujú zložitosť a nekonzistentnosť.

3.1. Šišinka mozgová a sekrécia melatonínu

Epifýza a jej primárny hormón, melatonín, boli významným predmetom výskumu neuroendokrinných reakcií na vystavenie ELF-EMF [11]. Melatonín je kľúčový pre reguláciu cirkadiánnych rytmov vrátane cyklov spánku a bdenia a pôsobí ako silný antioxidant [12]. Experimentálne štúdie na zvieratách, najmä na myšiach, preukázali, že vystavenie ELF-EMF, ako sú pulzné EMF s frekvenciou 50 Hz a 100 Hz, môže významne zmierniť nočný nárast melatonínu a znížiť nočné koncentrácie melatonínu v epifýze na denné úrovne [13]. Tento pozorovaný účinok na syntézu melatonínu v epifýze niektorých druhov naznačuje priamy zásah do základného biologického rytmu [14]. Je zaujímavé, že tieto poruchy sa zdajú byť reverzibilné, pričom normálny cirkadiánny rytmus sa obnoví do týždňa po ukončení vystavenia pulznému ENF-EMF [13]. Okrem toho, bunkové mechanizmy spojené s vystavením neionizujúcemu elektromagnetickému žiareniu vrátane nízkych frekvencií, ktoré sú zapojené do abnormalít štítnej žľazy, tiež poukazujú na znížené hladiny melatonínu ako dôsledok [3Nie všetky štúdie však prinášajú konzistentné výsledky. Niektoré experimentálne paradigmy, ako napríklad akútne vystavenie magnetickej indukcii B.=10−5T alebo 10−4Kontinuálne magnetické polia T počas 15 minút nenarušili nočný nárast epifýzy alebo sérového melatonínu [13]. Táto variabilita podčiarkuje komplexnosť biologických interakcií EMF, ktoré môžu byť vysoko závislé od špecifických parametrov expozície, ako je intenzita, trvanie a tvar vlny. Autoritatívne orgány, ako napríklad Vedecký výbor pre vznikajúce a novo identifikované zdravotné riziká (SCENIHR), zaznamenali absenciu systematických prehľadov a metaanalýz, ktoré by sa špecificky zaoberali „melatonínovou hypotézou“ v súvislosti s ENF-EMF, čo naznačuje medzeru v komplexnej syntéze dôkazov [15Citlivosť epifýzy na ELF-EMP a výsledné narušenie melatonínu naznačuje dvojaký vplyv. Po prvé, dochádza k priamemu narušeniu neuroendokrinných rytmov, ktoré sú nevyhnutné pre množstvo fyziologických procesov. Po druhé, a rovnako dôležité je potenciálne nepriame oslabenie vnútorného antioxidačného obranného systému tela. Úloha melatonínu ako lapača voľných radikálov znamená, že jeho potlačenie by mohlo ohroziť schopnosť tela pôsobiť proti oxidačnému stresu vyvolanému EMP, čím by sa vytvorila spätná väzba, kde znížený melatonín zhoršuje bunkovú zraniteľnosť voči poškodeniu. To znamená, že vplyv na melatonín nie je len narušením spánkových vzorcov, ale širším kompromisom bunkových ochranných mechanizmov.

3.2. Hypotalamo-hypofyzo-nadobličková (HPA) os a stresové hormóny

Hypotalamo-hypofyzo-nadobličková (HPA) os je kritická neuroendokrinná dráha zodpovedná za reguláciu reakcie tela na stres. Zahŕňa kaskádu hormonálnych signálov: hormón uvoľňujúci kortikotropín (CRH) z hypotalamu stimuluje sekréciu adrenokortikotropného hormónu (ACTH) z predného laloku hypofýzy, čo následne podnecuje kôru nadobličiek k uvoľňovaniu kortizolu (alebo kortikosterónu u hlodavcov) [4 Experimentálne štúdie na zvieratách opakovane naznačujú, že vystavenie ELF-EMP, ako sú polia s frekvenciou 50 Hz, môže modifikovať kľúčové neuronálne procesy a pôsobiť ako mierny stresor, čo prispieva k poruchám v rámci osi HPA. Výskum na potkanoch vystavených EMF s frekvenciou 50 Hz (pri B.=1 mT a 7 mT) preukázali, že takáto expozícia by mohla vytvoriť nový „nastavovací bod“ pre aktivitu osi HPA. Konkrétne pole s B.=1 mT indukoval adaptívny

stresová reakcia, zatiaľ čo pole s*B*.=7 mT viedlo k senzibilizácii, čo zdôrazňuje vplyv stresovej reakcie závislý od dávky a expozície [16].

U myší sa preukázalo, že vystavenie ELF-EMF významne zvyšuje sekréciu kortikosterónu [17]. Je zaujímavé, že k tomuto zvýšeniu došlo bez zodpovedajúceho zvýšenia celkovej aktivity osi hypotalamus-hypofýza-nadobličky, čo naznačuje priamu stimuláciu adrenálnej steroidogenézy, ktorá obchádza typické mechanizmy centrálnej spätnej väzby [18 rokov]. Ďalej to podporuje fakt, že vystavenie ELF-EMF (s frekvenciou 1 a 5 Hz) u potkanov zvýšilo mRNA proopiomelanokortínu (POMC) v prednej hypofýze, čo korelovalo so zvýšenými hladinami ACTH a kortikosterónu [19]. Je pozoruhodné, že POMC sa podieľa aj na syntéze melatonínu – elegantný príklad prepletených hormonálnych osí, kde vystavenie ELF mení mnoho hormonálnych procesov súčasne. Zatiaľ čo štúdie o rádiofrekvenčnom (RF) žiarení na termogénnych úrovniach tiež zaznamenali zvýšenie plazmatického kortikosterónu [20], zistenia týkajúce sa ELF-EMP sú menej konzistentné, s hláseniami o zvýšení, znížení alebo žiadnej zmene plazmatických steroidných hormónov. Prahová hodnota nad 10 kV/m pre elektrické pole s frekvenciou 60 Hz bola navrhnutá ako indukcia zmien kortikosterónu alebo testosterónu u psov a potkanov. V štúdiách na ľuďoch je priame meranie hormónov osi HPA v reakcii na nízkofrekvenčné EMP menej bežné. Nepriame dôkazy zo štúdií zameraných na prácu však naznačujú potenciálne vplyvy. Napríklad chronické vystavenie ELF-EMP na pracovisku medzi pracovníkmi elektrární bolo významne spojené so zvýšeným subjektívne hláseným stresom, depresiou a úzkosťou, spolu s horšou kvalitou spánku [21Tieto príznaky sú všeobecne uznávané ako prejavy dysregulácie osi HPA, čo naznačuje potenciálnu súvislosť. Vplyv ELF-EMF na os HPA sa javí ako komplexný a potenciálne vykazuje dvojfázovú alebo nelineárnu dávku-odozvu. To znamená, že EMF nemusia jednoducho spustiť generalizovanú stresovú reakciu; namiesto toho môžu priamo modulovať periférne endokrinné žľazy, čo vedie k „novému nastavenému bodu“ aktivity. Táto rekalibrácia stresového systému by mohla byť buď adaptívna, alebo by mohla prispievať k chronickým patológiám súvisiacim so stresom, a to aj bez zjavnej aktivácie centrálnej osi HPA, čo zdôrazňuje jemnú interakciu presahujúcu jednoduché lineárne účinky.

3.3. Funkcia štítnej žľazy a hormóny štítnej žľazy

Štítna žľaza hrá kľúčovú úlohu v metabolizme, raste a vývoji a jej povrchové umiestnenie ju robí citlivou na vonkajšie žiarenie vrátane neionizujúcich elektromagnetických polí, najmä zo zdrojov, ako sú mobilné telefóny [3]. Štúdie na zvieratách poskytli dôkazy o vplyve EMF na funkciu štítnej žľazy. Napríklad vystavenie myší ELF-EMF s frekvenciou 50 Hz počas 30 dní viedlo k významnému zvýšeniu koncentrácií fT4 (tyroxínu) a TSH (hormónu stimulujúceho štítnu žľazu), čo naznačuje aktiváciu produkcie hormónov štítnej žľazy [17]. Hoci sa pozoroval podobný trend pre fT3 (trijódtyronín), nedosiahol štatistickú významnosť. Je dôležité poznamenať, že štatistická významnosť nie je dostatočná na skúmanie takýchto súvislostí a malo by sa vykonať aj overenie ekvivalencie. Okrem toho sa v reakcii na termogénne hladiny RF žiarenia zaznamenali znížené hladiny hormónov štítnej žľazy, čo bolo spojené s inhibíciou sekrécie tyreotropínu hypofýzou [20Hoci sa toto špecifické zistenie týka RF, zdôrazňuje os HPT ako potenciálny cieľ pre rôzne frekvencie EMF.

Prehľadové články, ktoré často syntetizujú údaje z rôznych frekvencií neionizujúcich EMF, zdôraznili komplexnejšie vplyvy. Systematický prehľad neionizujúcich EMF a dysfunkcií štítnej žľazy identifikoval hypotyreózu ako najčastejšie hlásenú funkčnú abnormalitu [3Okrem hormonálnych zmien prehľad podrobne popísal aj významné morfologické abnormality štítnej žľazy vrátane zvýšeného folikulárneho epitelu a interfolikulárneho tkaniva, zníženého objemu koloidu, zmien v lyzozómoch, granulárnom endoplazmatickom retikule, bunkových jadrách a zmien v žľazových štruktúrach, ako je bunková hypotrofia, žľazová hypertrofia a zvýšená apoptóza prostredníctvom kaspázovo závislého ochorenia.

dráh. Pozorovacie štúdie citované v týchto prehľadoch tiež zaznamenali nárast výskytu rakoviny štítnej žľazy a zmeny priemeru štítnej žľazy, pričom lekárska hypotéza naznačuje potenciálnu súvislosť medzi rakovinou štítnej žľazy a vystavením sa elektromagnetickým poliam [3] a rakovina vo všeobecnosti [22Napriek týmto zisteniam pretrvávajú značné medzery vo výskume. Kritické prvky, ako sú presné účinky a mechanizmy vystavenia EMF na transportéry hormónov štítnej žľazy, genomické a negenomické pôsobenie, špecifické podmienky potrebné na spustenie týchto účinkov a výsledné adaptované reakcie, neboli úplne preskúmané [3Pozorované morfologické zmeny v štítnej žľaze, ktoré presahujú jednoduché výkyvy hladín hormónov, naznačujú, že elektromagnetické polia môžu ovplyvniť nielen produkciu alebo vylučovanie hormónov, ale aj štrukturálnu integritu a základné bunkové procesy v samotnej žľaze. Tieto štrukturálne zmeny by mohli tvoriť základ funkčných abnormalít, ako je hypotyreóza, a potenciálne prispievať k dlhodobým patologickým výsledkom vrátane onkogenézy. To naznačuje výraznejší vplyv na zdravie štítnej žľazy, ako sa pôvodne predpokladalo len na základe hormonálnych zmien.

3.4. Funkcia gonád a reprodukčné hormóny

Potenciálny vplyv elektromagnetických polí na reprodukčné zdravie je významnou oblasťou výskumu, pričom početné štúdie skúmajú ich účinky na funkciu pohlavných žliaz a reprodukčné hormóny. Mnohé štúdie in vivo (na zvieratách) a in vitro (na bunkových kultúrach) zhodne naznačujú, že vystavenie elektromagnetickým polím môže zmeniť reprodukčnú funkciu a vývoj plodu v rôznych živočíšnych systémoch [2Medzi hlásené zmeny patrí smrť samčích zárodočných buniek, narušenie estrálneho cyklu, zmeny hladín reprodukčných endokrinných hormónov, zmeny hmotnosti reprodukčných orgánov, znížená pohyblivosť spermií, vplyv na skorý embryonálny vývoj a znížená miera úspešnosti tehotenstva. Konkrétnejšie sa zistilo, že vystavenie pílovitým ELF-EMF s frekvenciou 20 kHz u samíc myší ovplyvňuje normálny cyklus estrálneho cyklu narušením fyziológie ženského reprodukčného endokrinného systému [23]. Okrem toho sa ukázalo, že vystavenie buniek granulózy potkanov ELF-EMF spôsobuje poškodenie DNA. Štúdie tiež naznačujú, že elektrické pole s frekvenciou 60 Hz presahujúce 10 kV/m môže viesť k zmenám v koncentráciách testosterónu v krvi u psov a potkanov [20]. Epidemiologický výskum na ľuďoch však predstavuje zložitejší a často protichodný obraz. Nedávny zastrešujúci prehľad a metaanalýza, ktorá syntetizuje zistenia z viacerých systematických prehľadov, uvádza významné nepriaznivé účinky vystavenia nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam (až do 300 Hz) na výsledky reprodukčného zdravia [24,25]. Patrili sem najmä obavy týkajúce sa kvality spermií (znížená pohyblivosť a zvýšené poškodenie DNA) a výsledkov pôrodu (zvýšené riziko nízkej pôrodnej hmotnosti). Naopak, iné štúdie na ľuďoch, vrátane epidemiologických údajov o vrodených chybách a potratoch u tehotných kancelárskych pracovníčok, vo všeobecnosti neboli úspešné v preukázaní takýchto účinkov [23]. Okrem toho štúdia o pracovníkoch elektrární vystavených magnetickým poliam ELF dospela k záveru, že neexistuje „žiadna súvislosť" medzi expozíciou a hladinami reprodukčných hormónov (ako je testosterón, LH a FSH), hoci uznala obmedzenia pri definitívnom hodnotení mužskej plodnosti bez presnejších metód [26]. Táto štúdia tiež poukázala na existujúce protichodné výsledky medzi štúdiami reprodukčných hormónov na ľuďoch a zvieratách. K tejto nezrovnalosti sa pridáva stanovisko SCENIHR, ktoré uviedlo, že dostupné systematické prehľady a metaanalýzy nepreukázali súvislosť medzi vystavením ELF-EMF a tehotenstvom alebo reprodukčnými výsledkami [15]. Hlási sa aj riziko potratov v závislosti od vystavenia ENF-EMF [22Silnejšie dôkazy o reprodukčnom vplyve, najmä zo štúdií na zvieratách, sú v ostrom kontraste s protichodnými údajmi o ľuďoch. Zatiaľ čo zvieracie modely konzistentne preukazujú celý rad reprodukčných porúch, epidemiologické dôkazy o ľuďoch zostávajú kontroverzné. Vznik nedávnej metaanalýzy naznačujúcej významné nepriaznivé reprodukčné účinky si zaslúži vážne zváženie, ale je v priamom rozpore s inými preskúmaniami na vysokej úrovni.

zdôrazňuje naliehavú potrebu robustnejších, štandardizovanejších a transparentnejších epidemiologických štúdií na ľuďoch s cieľom vyriešiť tento kritický problém verejného zdravia. Táto nerovnosť naznačuje, že zložitosť expozície ľudí, životného štýlu a genetickej variability môže zakrývať účinky, ktoré sa ľahšie pozorujú v kontrolovaných laboratórnych podmienkach.

3.5. Ostatné zložky endokrinného systému

Okrem hlavných endokrinných osí (šišinka mozgová, hypotalamus-hypofýza, štítna žľaza a pohlavné žľazy) výskum naznačuje, že nízkofrekvenčné elektromagnetické pole môžu ovplyvňovať aj iné zložky endokrinného systému, čo naznačuje širšiu systémovú zraniteľnosť. Napríklad štúdie na potkanoch vystavených ELF-EMP (f=60 Hz, B.=10−4T) odhalili zmeny v distribúcii a výskyte gastrín-, ghrelín- a somatostatín-pozitívnych endokrinných buniek v žalúdku [14]. Hoci zmeny v sekrécii týchto hormónov do krvného obehu neboli štatisticky významné, pozorované bunkové zmeny naznačujú vplyv na vnútorný regulačný systém tráviaceho traktu. To naznačuje, že elektromagnetické polia môžu ovplyvniť lokálne neuroendokrinné bunky, ktoré zohrávajú úlohu vo funkcii gastrointestinálneho traktu, aj keď systémové hormonálne hladiny nie sú okamžite ovplyvnené. Vo všeobecnosti sa vystavenie ELF-EMP spája so všeobecnými „zmenami v hormonálnej regulácii“ [27]. Toto všeobecné tvrdenie poukazuje na difúzny vplyv, ktorý nemusí byť obmedzený na špecifické, dobre definované endokrinné dráhy. Boli hlásené aj priame morfologické a potenciálne funkčné vplyvy na hypofýzu. Ukázalo sa, že vystavenie ELF-EMF znižuje veľkosť buniek produkujúcich ACTH, objem ich jadier a celkovú hmotnosť hypofýzy u potkanov [17]. Toto pozorovanie naznačuje priamy vplyv na hypofýzu, nezávisle od jej úlohy v rámci osi HPA, čo naznačuje potenciál štrukturálnych zmien, ktoré by mohli viesť k zmenenému hormonálnemu výdaju. Pozorované účinky na rôzne endokrinné bunky, ako sú tie v gastrointestinálnom trakte, a priame morfologické zmeny v hypofýze naznačujú systémovú zraniteľnosť endokrinného systému voči ELF-EMF. To znamená, že vplyv týchto polí nie je obmedzený na hlavné, dobre charakterizované endokrinné osi, ale môže sa rozšíriť na širšie spektrum buniek a žliaz produkujúcich hormóny v celom tele. Extrémnym príkladom je zvýšená koncentrácia histamínu v krvi pacientov, ktorí boli vystavení ELF [28]. Tento široký vplyv si vyžaduje ďalšie skúmanie iných endokrinných žliaz a ich špecifických hormonálnych sekrétov, pretože súčasný výskum môže odhaľovať len zlomok celého rozsahu interakcií medzi elektromagnetickými políčkami a endokrinným systémom. Stručné zhrnutie je uvedené v tabuľke1.

Tabuľka 1.Súhrn hlásených účinkov na endokrinný systém podľa žľazy/hormónu.

Endokrinný Žľaza/Hormón	Pozorovaný účinok	Frekvenčný rozsah	Typ štúdie	Konzistencia Zistenia	Referencie
Šišinka mozgová/melatonín	Znížený nočný vzostup; znížený nočný spánok koncentrácie; znížené hladiny	ELF (50 – 100 Hz) pulzný)	Zviera in vivo	Konzistentné (zviera), Nekonzistentné (celkovo)	[3,13]
HPA Axis/kortikosterón, ACTH	Zmenená „úroveň“ aktivity; zvýšená hladina kortikosterónu (priama stimulácia nadobličiek); zvýšená mRNA POMC, ACTH, kortikosterón	ELF (50 Hz, 1–7 mT; 1–5 Hz)	Zviera in vivo	Konzistentné (zvieracie)	[4,18 rokov,19]
Štítna žľaza/FT3, FT4	Zvýšený FT4; znížený FT3, FT4 (RF); hypotyreóza; morfologické zmeny; zvýšený výskyt rakoviny (recenzie)	ENF (50 Hz); VF (všeobecné); Neionizujúce (všeobecné)	Zviera in vivo, Recenzia, Pozorovacie	Zmiešané (zvieracie), Konzistentné (recenzia) morfologických)	[3,17,20]

Tabuľka 1.*Pokračovanie*

Endokrinný Žľaza/Hormón	Pozorovaný účinok	Frekvenčný rozsah	Typ štúdie	Konzistencia Zistenia	Referencie
Pohlavné žľazy/Reprodukčné Hormóny	Úmrtie samčích zárodočných buniek, zmeny estrálneho cyklu, porušené hladiny hormónov, znížená pohyblivosť spermií, pôrod výsledky, narušenie estrálneho cyklu, zvýšené riziko nízkej pôrodnej hmotnosti, poškodenia DNA spermií (metaanalýza)	VLF (20 kHz) pílovitý); ELF (60 Hz); LF (všeobecné)	Zviera in vivo, in vitro, človek Metaanalýza	Konzistentné (zviera), Protirečivé (človek)	[2,22–24]
Gastrointestinálne Endokrinné bunky	Zmenené rozdelenie/ výskyt gastrínových, ghrelínových a somatostatínových buniek	ELF (60 Hz, 0,1 mT)	Zviera in vivo	Vzácne	[14]
Hypofýza	Znížená veľkosť ACTH buniek, objem jadier, hmotnosť žľazy	ELF (všeobecne)	Zviera in vivo	Vzácne	[17]
Žírne bunky	Zvýšené uvoľňovanie histamínu	ELF (všeobecne)	Človek	Vzácne	[28]

4. Mechanizmy interakcie EMF s endokrinným systémom

Pochopenie toho, ako ENF-EMF ovplyvňujú endokrinný systém, si vyžaduje preskúmanie základných bunkových a molekulárnych dráh. Bolo navrhnutých niekoľko mechanizmov, pričom oxidačný stres a modulácia iónových kanálov sa vynárajú ako hlavné hypotézy.

4.1. Úloha oxidačného stresu a reaktívnych foriem kyslíka (ROS)

Oxidačný stres (OS) je stav, pri ktorom produkcia reaktívnych foriem kyslíka (ROS) – vysoko reaktívnych molekúl obsahujúcich kyslík – preťažuje antioxidačný obranný systém tela, čo vedie k poškodeniu buniek [29]. Hoci antropogénne elektromagnetické polia nie sú ionizujúce a nemôžu priamo narušiť molekulárne väzby, predpokladá sa, že spúšťajú biosyntézu reaktívneho kyslíka (ROS) v biologických tkanivách, čím nepriamo spôsobujú poškodenie biomolekúl vrátane DNA [22, 30]. Dôkazy podporujúce oxidačný stres vyvolaný EMP sú značné. Početné štúdie uvádzajú, že vystavenie EMP vedie k oxidačnému stresu v rôznych tkanivách, zvyšuje koncentrácie voľných radikálov a ovplyvňuje procesy rekombinácie radikálových párov [29Nadprodukcia ROS a následný oxidačný stres sú často spojené s nepravidelným ovládaním napäťovo riadených iónových kanálov (VGIC) v bunkových membránach [30]. Toto narušenie môže viesť k tvorbe ROS prostredníctvom bunkových systémov a enzýmov, ako je napríklad reťazec transportu elektrónov (ETC) v mitochondriách, NADPH/NADH oxidázy (NOX) a syntázy oxidu dusnatého (NOS) [30Napríklad sa ukázalo, že vystavenie ELF-EMF zvyšuje expresiu NOS a superoxidu (O_2^-), typ ROS, hoci tieto účinky boli niekedy kompenzované kompenzačným zvýšením aktivity antioxidačných enzýmov, ako je kataláza (CAT) [31]. Okrem toho, zvýšené voľné radikály a intracelulárny vápnik ($[Ca^{2+}]i$) sa predpokladá, že sprostredkujú účinky EMF, čo môže viesť k inhibícii rastu buniek, nesprávnemu skladaniu proteínov a zlomom DNA [2]. Nedávne observačné štúdie a metaanalýzy na ľuďoch tiež naznačujú zvýšený oxidačný stres ako klinický vzorec toxických účinkov na zdravie spojených s vystavením elektromagnetickým poliam [32]. Oxidačný stres teda slúži ako centrálna, následná dráha. Viaceré dôkazy sa zbiehajú v názore na oxidačný stres ako kľúčový mechanizmus s podrobnými vysvetleniami, ktoré ilustrujú, ako môžu elektromagnetické polia (EMP) prostredníctvom netermálnych prostriedkov, ako je modulácia iónových kanálov, viesť k nadprodukcii ROS, čo následne spôsobuje poškodenie buniek. To stavia oxidačný stres nie ako počiatočnú interakciu, ale ako kritický dôsledok, ktorý sprostredkováva širokú škálu pozorovaných biologických účinkov vrátane narušení endokrinného systému. Pochopenie toho, ako EMP spúšťajú túto nadprodukciu ROS, je kľúčové pre vývoj cielených intervencií alebo ochranných stratégií proti ich potenciálnym vplyvom na zdravie.

4.2. Modulácia iónových kanálov a homeostáza vápnika

Hlavný navrhovaný mechanizmus interakcie EMF s biologickými látkami, najmä pri nízkych frekvenciách, zahŕňa moduláciu iónových kanálov a následné narušenie homeostázy vápnika. „Mechanizmus iónovo vynútenej oscilácie (IFO)-VGIC“ predpokladá, že mobilné ióny v napäťovo riadených iónových kanáloch (VGIC) sú nútené oscilovať aplikovanými ELF/ULF EMF [30]. Táto vynútená oscilácia pôsobí silami na napäťové senzory týchto kanálov, čo vedie k ich nepravidelnému hradlovaniu. Dysfunkcia iónových kanálov, najmä prostredníctvom nepravidelného hradlovania, narúša intracelulárne koncentrácie iónov, čo vedie najmä k zvýšeniu intracelulárneho vápnika ($[Ca^{2+}]i$) [2]. Toto narušenie homeostázy vápnika sa považuje za kritický spúšťač nadprodukcie reaktívnych foriem kyslíka (ROS), pričom tento mechanizmus priamo spája s oxidačným stresom [30]. Priame experimentálne dôkazy naznačujú, že nízkofrekvenčné polia sú vysoko bioaktívne a spôsobujú vynútené vibrácie voľných iónov na plazmatickej membráne bunky, čo následne vedie k nepravidelnému hradlovaniu elektrosenzitívnych kanálov a narušeniu elektrochemickej rovnováhy bunky [33]. Tento mechanizmus môže tiež poskytnúť vysvetlenie, prečo by pulzné EMF mohli byť bioaktívnejšie ako kontinuálne polia s podobnými charakteristikami. Okrem toho, vystavenie neionizujúcim EMF, vrátane nízkych frekvencií, bolo špecificky spojené so zvýšením hladiny vápnika (Ca^{2+}) odtok [3]. Modulácia iónových kanálov, najmä tých, ktoré zahŕňajú vápnik, sa javí ako základný a primárny biofyzikálny mechanizmus, ktorým nízkofrekvenčné EMP interagujú s biologickými systémami. Toto pochopenie je kľúčové pre objasnenie základnej príčiny mnohých pozorovaných účinkov. Naznačuje, že EMP nielenže spôsobujú oxidačný stres, ale skôr iniciujú kaskádu udalostí prostredníctvom narušenia iónových kanálov, ktoré potom vedú k oxidačnému stresu a následným endokrinným účinkom. Tieto základné poznatky by mohli viesť k vývoju stratégií na zmiernenie vplyvov EMP zameraním sa na tieto počiatočné bunkové reakcie.

4.3. Nelineárne vzťahy medzi dávkou a odozvou a horméza

Tradičná toxikológia často predpokladá lineárny vzťah medzi dávkou látky a rozsahom biologického účinku; štúdie nízkofrekvenčných elektromagnetických polí však tento predpoklad spochybňujú a naznačujú, že ich účinky nemusia vykazovať konvenčný lineárny vzťah medzi dávkou a účinkom, ale môžu byť nelineárne [34]. Kľúčovým konceptom pre pochopenie tejto nelinearity je horméza. Horméza opisuje jav, pri ktorom nízke dávky stresora môžu vyvolať adaptívnu alebo dokonca prospešnú biologickú reakciu, zatiaľ čo vyššie dávky toho istého stresora sa stávajú škodlivými [4]. To znamená, že účinky EMF môžu byť obojsmerné v závislosti od intenzity a trvania expozície. Napríklad v štúdiách na potkanoch bolo EMF s f=50 Hz a $B = 10^{-3}$T indukoval adaptívnu stresovú reakciu v osi HPA, zatiaľ čo EMF s $B = 7 \cdot 10^{-3}$T spôsobil senzibilizáciu. Podobne sa uvádza, že nízkointenzívne EMF majú neuroprotektívne účinky, ako je podpora produkcie ochranných proteínov (napr. Hsp70 alebo BDNF) alebo zvýšenie aktivity antioxidačných enzýmov. Hormetický vzťah medzi dávkou a odozvou sa môže vyskytnúť po počiatočnom narušení homeostázy, čo si vyžaduje expresiu génov a syntézu proteínov na obnovenie biologickej rovnováhy. Prítomnosť nelineárnych vzťahov medzi dávkou a odozvou a hormézy v interakciách EMF a endokrinného systému si vyžaduje zmenu paradigmy v dizajne a interpretácii výskumu. To znamená, že štúdie, ktoré vykazujú „žiadny účinok“ pri určitých úrovniach alebo dokonca „priaznivé účinky“ pri veľmi nízkych úrovniach (v súlade s terapeutickými aplikáciami EMF [19,22]), nemusí byť v rozpore s pozorovaniami škodlivých účinkov pri iných, vyšších intenzitách alebo rôznych trvaniach. Namiesto toho naznačuje komplexnú interakciu, kde biologická reakcia vysoko závisí od presných parametrov expozície (intenzita, frekvencia, trvanie a tvar vlny) a dokonca aj od počiatočnej „nastavenej hodnoty“ alebo fyziologického stavu biologického systému. Táto komplexnosť zdôrazňuje potrebu budúcich štúdií, ktoré by dôkladne kontrolovali a zaznamenávali parametre expozície, skúmali širší rozsah intenzít a zohľadnili kumulatívne a adaptívne reakcie.

biologických systémov, pričom sa ide za hranice zjednodušených lineárnych modelov s cieľom presne posúdiť zdravotné riziká aj potenciálne terapeutické aplikácie.

4.4. Iné bunkové a molekulárne dráhy

Okrem oxidačného stresu a modulácie iónových kanálov výskum naznačuje, že ELF-EMP môžu ovplyvňovať endokrinný systém prostredníctvom mnohostranného vplyvu na základné bunkové procesy. Ukázalo sa, že vystavenie EMF mení celkovú bunkovú homeostázu, čo môže viesť k účinkom, ako je inhibícia rastu buniek, nesprávne skladanie proteínov a zlomy DNA [2,30]. Na genetickej úrovni môžu elektromagnetické polia meniť transkripčné a translačné procesy vrátane expresie génov stresovej reakcie, ako sú hsp70, myc, jun a fos [14]. Môžu tiež modulovať génovú expresiu, ovplyvňovať diferenciáciu buniek a ovplyvňovať prežitie populácií nervových buniek [31]. Ďalším cieľom je aktivita enzýmov. Elektromagnetické polia môžu stimulovať aktivitu mnohých enzýmov [14Konkrétne, vystavenie neionizujúcemu elektromagnetickému žiareniu sa spája so zvýšenou aktivitou ornitíndekarboxylázy (ODC) a proteínkinázy C (PKC), ako aj s poruchami hladiny Na.+/K+fosfatázové aktivity [3]. Okrem toho je známe, že elektromagnetické polia stimulujú oxidačno-redukčné procesy v bunkách [14]. Na základnej úrovni môžu účinky elektromagnetických polí súvisieť s primárnymi poruchami vyskytujúcimi sa v bunkových a mitochondriálnych membránach [35]. Pokiaľ ide o neurologický dopad, chronické vystavenie EMF s f=60 Hz u opíc naznačovalo pokles koncentrácií neurotransmiterov [20]. Pozorovaný vplyv ELF-EMP na endokrinný systém je sprostredkovaný komplexnou súhrou bunkových a molekulárnych mechanizmov, ktoré presahujú priamu hormonálnu syntézu alebo sekréciu. Tieto mechanizmy, ako napríklad zmenená génová expresia enzýmov syntetizujúcich hormóny alebo zmeny vo funkcii membránových receptorov, môžu nepriamo, ale hlboko ovplyvniť endokrinnú funkciu, aj keď samotná žľaza nie je zjavne „poškodená“. Pochopenie týchto širších bunkových cieľov, vrátane génovej regulácie, kinetiky enzýmov a integrity membrány, je kľúčové pre holistické pochopenie bioaktivity EMP a pre identifikáciu potenciálnych biomarkerov expozície a účinku. Prehľad vyššie uvedených mechanizmov interakcií EMF s endokrinným systémom je uvedený v tabuľke2.

Tabuľka 2.Súhrn hlásených účinkov na endokrinný systém podľa ovplyvnených bunkových procesov.

Mechanizmus Kategória	Kľúčové molekulárne/bunkové udalosti	Dôsledky pre endokrinný systém Funkcia	Referencie
Oxidačný stres (operačný systém)	Biosyntéza reaktívnych foriem kyslíka (ROS); zvýšené koncentrácie voľných radikálov; ohrozenie antioxidačnej obrany	Poškodenie buniek, nesprávne poskladanie bielkovín; zlomy DNA; narušená bunková homeostáza; zvýšená náchylnosť na iné patológie	[2,12,29,30]
Iónový kanál Modulácia	Nepravidelné hradlovanie napäťovo riadených iónových kanálov (VGIC); vynútená oscilácia mobilných iónov; narušenie intracelulárne iónové koncentrácie	Narušená homeostáza vápnika (zvýšený [Ca2+]i); spúšťač nadprodukcie ROS	[30]
Nelineárne Dávka-odpoveď (Hormeza)	Obojsmerný účinok v závislosti od intenzity; adaptívne vs. senzibilizačné reakcie; vyžaduje gén expresia/syntéza proteínov pre obnovenie homeostázy	Komplexné, nemonotónne účinky na os HPA a ďalšie systémy; potenciál pre terapeutické aplikácie pri nízkych intenzitách	[4,11]
Iné mobilné zariadenia Cesty	Zmenená bunková homeostáza; zmenená génová expresia (napr. hsp70); modulovaná enzýmová aktivita (ODC, PKC, Na+/K+ATPáza); stimulované oxidačno-redukčné procesy; poruchy membrán	Dysfunkčný hormón produkcia/signalizácia; narušená bunková komunikácia; zmenené fyziologické reakcie	[3,14,35]

4.5. Dozimetrické podmienky súvisiace s analyzovanými štúdiami

Na základe súčasného výskumu sa vplyv dozimetrie EMF (presné meranie a charakterizácia expozície) považuje za najdôležitejší faktor pri riešení nezrovnalostí pozorovaných v endokrinných štúdiách. Niekoľko nedávnych a základných článkov zdôrazňuje, ako premenné, ako je trvanie, prahy intenzity a SAR (špecifická miera absorpcie), určujú, či je hormonálna reakcia adaptívna, patologická alebo len vedľajší produkt experimentálneho stresu. Významnou výzvou v endokrinnom výskume je určiť, či je hormónový skok (ako kortizol alebo ACTH) spôsobený EMF alebo stresom z umiestnenia v expozičnej klietke. Výskumníci použili dozimetriu s vysokým rozlíšením (hodnoty SAR 2 W/kg oproti 10 W/kg), aby ukázali, že iba nadmerné miery absorpcie energie (10 W/kg) spôsobili významné hormonálne zmeny, ktoré bolo možné jasne odlíšiť od stresom odvodeného pozadia experimentálneho postupu [PT2]. Táto štúdia na druhej strane zistila, že krátke expozície (5 – 30 min) poliam s frekvenciou 50 Hz (0,1 – 1,0 mT) modulovali redoxný stav a Ca^{2+}manipulácia, zatiaľ čo na podporu diferenciácie prostredníctvom medzerových spojení boli potrebné dlhé expozície (24 – 72 hodín) [PT1]. Systematické prehľady údajov o zvieratách naznačujú prahovú hodnotu pre elektrické polia s frekvenciou 60 Hz nad 10 kV/m, ktorá spôsobuje detekovateľné zmeny v koncentráciách kortikosterónu alebo testosterónu v krvi [PT3].

5. Zistenia zo štúdie na zvieratách a ľuďoch

Komplexné pochopenie vplyvu elektromagnetických polí na endokrinný systém si vyžaduje kritické zhodnotenie zistení z rôznych výskumných metodík, najmä rozlišovanie medzi kontrolovanými laboratórnymi štúdiami (na zvieratách a in vitro) a komplexnými epidemiologickými výskumami u ľudí.

5.1. Kľúčové zistenia zo štúdií in vivo a in vitro

Experimentálne štúdie na zvieratách a výskumy in vitro (bunkové kultúry) tvoria väčšinu výskumov, ktoré naznačujú, že elektromagnetické polia môžu ovplyvniť sekréciu hormónov a zmeniť rôzne bunkové procesy [2]. Tieto kontrolované prostredia ponúkajú významné výhody, pretože umožňujú presnú kontrolu nad expozičnými podmienkami vrátane frekvencie, intenzity, trvania a tvaru vlny a umožňujú podrobné skúmanie základných biologických mechanizmov na bunkovej a molekulárnej úrovni [4].

Medzi konzistentné pozorovania z týchto modelov patria:

- narušenie vylučovania melatonínu z epifýzy [13],
- zmeny aktivity osi HPA a hladiny stresových hormónov, ako sú kortikosterón a ACTH [4],
- zmeny v produkcii hormónov štítnej žľazy, konkrétne fT4 [17],
- nepriaznivé vplyvy na reprodukčnú funkciu, vrátane narušenia estrálneho cyklu, zmien v kvalite spermií a zmenených hladín hormónov [2],
- identifikácia základných bunkových zmien, ako je zvýšený oxidačný stres, zmenená aktivita iónových kanálov a poškodenie DNA, ktoré poskytujú mechanistické vysvetlenia pozorovaných endokrinných porúch [3].

Konzistentnosť zistení z mnohých štúdií na zvieratách a in vitro, najmä pokiaľ ide o špecifické endokrinné poruchy a základné bunkové mechanizmy, ako je oxidačný stres a modulácia iónových kanálov, potvrdzuje silnú mechanistickú vierohodnosť účinkov ELF-EMF na endokrinný systém. Hoci priama extrapolácia týchto zistení na ľudí nie je vždy jednoduchá kvôli druhovým rozdielom a zložitosti ľudskej fyziológie, tieto štúdie poskytujú základné biologické pochopenie...*ako* takéto účinky*mohol*vyskytujú sa. Sú kľúčové pri vytváraní hypotéz a preukazovaní, že elektromagnetické polia sú skutočne biologicky aktívne, aj keď priame dôsledky pre ľudské zdravie zostávajú predmetom prebiehajúcej diskusie.

5.2. Výzvy a nezrovnalosti v epidemiologickom výskume u ľudí

Na rozdiel od relatívne konzistentných zistení v kontrolovaných laboratórnych podmienkach sú údaje o účinkoch elektromagnetických polí na ľudský endokrinný systém často nedostatočné, nekonzistentné alebo protirečivé [35]. Táto nerovnosť predstavuje kritickú „translačnú medzeru“ medzi predklinickými a ľudskými štúdiami. Pozoruhodným príkladom tejto nekonzistentnosti je oblasť reprodukčného zdravia. Jedna nedávna zastrešujúca analýza a metaanalýza naznačili významné nepriaznivé účinky vystavenia ELF-EMF (až do 300 Hz) na reprodukčné výsledky, pričom sa konkrétne uvádzala znížená kvalita spermií a zvýšené riziko nízkej pôrodnej hmotnosti [24]. To je však v rozpore so závermi autoritatívnych prehľadov, ako sú napríklad prehľady SCENIHR a ICNIRP, ktoré uvádzajú, že dostupné systematické prehľady nepreukázali súvislosť medzi vystavením ELF-EMF a tehotenstvom alebo reprodukčnými výsledkami [15]. Okrem toho niektoré štúdie na ľuďoch, vrátane epidemiologických údajov o vrodených chybách a potratoch u tehotných kancelárskych pracovníčok, vo všeobecnosti neúspešne preukázali takéto účinky [23]. Oficiálne agentúry často zdôrazňujú obmedzenú a protichodnú povahu výskumu elektromagnetických polí a tvrdia, že pri súčasných úrovniach expozície nie sú nízke a extrémne nízke frekvencie elektromagnetických polí trvalo spojené so zvýšenými zdravotnými rizikami [5]. V prípade polí so strednou frekvenciou (IF) sú experimentálne a epidemiologické údaje obzvlášť vzácne, čo sťažuje dôkladné posúdenie akútnych zdravotných rizík. K týmto protichodným výsledkom prispieva niekoľko metodologických obmedzení, ktoré sú vlastné epidemiologickým štúdiám na ľuďoch:

- Posúdenie expozície: Hlavnou výzvou je ťažkosti s presným posúdením dlhodobej expozície ľudí elektromagnetickým poliam na nízkej úrovni v reálnych podmienkach. Mnohé štúdie neobsahujú osobné merania a namiesto toho sa spoliehajú na blízkosť bydliska alebo zamestnania, čo nemusí odrážať skutočnú individuálnu expozíciu [36].
- Mätúce faktory: štúdie na ľuďoch majú problém adekvátne kontrolovať nespočetné množstvo ďalších environmentálnych, životných a genetických faktorov, ktoré významne ovplyvňujú endokrinné zdravie, čo sťažuje izoláciu špecifických účinkov elektromagnetických polí [24].
- Nedostatočná štandardizácia: nekonzistentné metodiky, rôzne parametre expozície a rozmanité merania výsledkov v rôznych štúdiách bránia porovnateľnosti a prispievajú k pozorovaným nezrovnalostiam [3,6].
- Etické obmedzenia: etické obmedzenia vykonávania kontrolovaných experimentálnych štúdií expozície u ľudí obmedzujú schopnosť skúmať vzťahy medzi dávkou a reakciou alebo špecifické mechanizmy u ľudí [6].

Výrazný kontrast medzi relatívne konzistentnými zisteniami v kontrolovaných štúdiách na zvieratách a in vitro štúdiách a vysoko nekonzistentnými alebo nedostatkovými epidemiologickými údajmi o ľuďoch predstavuje kritickú „translačnú medzeru“. Táto medzera nemusí nevyhnutne svedčiť o absencii účinku u ľudí, ale skôr zdôrazňuje inherentnú zložitosť výskumu epidemiológie u ľudí. Biologický signál účinkov elektromagnetických polí môže byť reálny, ale je náročné ho konzistentne detekovať uprostred vysokého „šumu“ variability v reálnom svete u ľudí, početných mätúcich faktorov a nepresných meraní expozície. Protichodné metaanalýzy reprodukčného zdravia ďalej zdôrazňujú potrebu metodologickej presnosti a transparentnosti pri syntéze dôkazov u ľudí. Vyvodzovanie definitívnych záverov o rizikách pre ľudské zdravie z nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na endokrinný systém je týmito obmedzeniami výrazne obmedzené. Riešenie tohto problému si vyžaduje spoločné úsilie o implementáciu prísnejších, štandardizovaných metodík vrátane zlepšeného hodnotenia expozície, longitudinálnych štúdií a potenciálne nových prístupov k zohľadňovaniu individuálnej variability a kumulatívnych expozícií, aby sa táto translačná medzera preklenula. Najdôležitejším bodom v každej štúdii elektromagnetických polí je, že merania musia byť čo najpresnejšie a úroveň individuálnej expozície musí byť stanovená čo najpresnejšie, pričom výber metódy (či už ide o osobný monitor expozície alebo akýkoľvek iný prostriedok) má druhoradý význam.

5.3. Mapovanie konfliktu: Naratívna analýza epidemiologických nezrovnalostí

Aby sa vyriešil súčasný spoločenský a vedecký zmätok, táto recenzia identifikuje tri „preukázané fakty“, ktoré slúžia ako spoločný základ pre výskumníkov s rôznymi perspektívami. Fakt jedna: „Atermálna medzera“ ako regulačný fakt: častým bodom zmätku je presvedčenie, že ak je účinok pod prahom pre normy ICNIRP/IEEE, je biologicky nemožný. Spoločným faktom je, že súčasné normy sú navrhnuté tak, aby zabránili akútnej elektrostimulácii (nervovej stimulácii) alebo tepelnému poškodeniu. Neboli vytvorené tak, aby zohľadňovali biochemickú signalizáciu (ROS a Ca^{2+}) diskutované v tejto recenzii. Uznanie tejto atermálnej medzery umožňuje zainteresovaným stranám zhodnúť sa na tom, že biologická aktivita môže prebiehať bez porušenia existujúcich bezpečnostných limitov; tieto dve fungujú v rôznych fyziologických doménach. Fakt dva: Fakt „Proxy vs. Meranie“ v epidemiológii. Pri skúmaní rozdielov medzi reprodukčnými alebo rakovinovými štúdiami sa opakujúcim sa naratívom stáva metóda hodnotenia expozície. To možno vidieť v dvoch rozdielnych bodoch, t. j. štúdie, ktoré neuvádzajú žiadny účinok, často používajú rezidenčné zástupné metódy (napr. vzdialenosť od elektrického vedenia) a štúdie, ktoré uvádzajú „nežiaduce účinky“, často používajú osobné dozimetre alebo bodové merania, ktoré zachytávajú variácie píkov. Zainteresované strany sa môžu zhodnúť na tom, že „Proxy“ metóda je náchylná na vysokú neistotu, zatiaľ čo „Meranie“ poskytuje údaje vyššej kvality. Vzdelávanie o tomto rozdiele pomáha vysvetliť, prečo by metaanalýza mohla ukázať protichodné výsledky na základe „kvality“ použitej expozície. Fakt tri: Status skupiny IARC 2B: „Kávový precedens“. Klasifikácia ELF-EMF ako „možno karcinogénna“ (skupina 2B) je verejnosťou často nesprávne interpretovaná ako nebezpečná a skeptici ako nevýznamná. Táto kategória predstavuje obmedzené dôkazy, čo znamená, že údaje sú príliš nejednoznačné na to, aby sa dalo potvrdiť alebo vylúčiť riziko. História kávy (preklasifikovaná z 2B do skupiny 3 v roku 2016) slúži ako vzdelávací príklad. Káva nebola presunutá preto, že sa stala bezpečnejšou, ale preto, že výskumníci konečne zohľadnili mätúce premenné, ako je fajčenie. Zainteresované strany sa môžu zhodnúť na tom, že výskum ELF-EMF sa v súčasnosti nachádza v podobnej metodologickej dileme a iba dozimetria s vyšším rozlíšením môže posunúť dôkazy smerom k definitívnemu statusu Skupina 1 (karcinogénna) alebo Skupina 3 (neklasifikovateľná).

6. Nedostatky vo vedomostiach a priority výskumu

Vedecké chápanie vplyvu ENF-EMF na endokrinný systém je zložité a vyznačuje sa presvedčivými mechanistickými poznatkami z laboratórnych štúdií a významnými nezrovnalosťami v epidemiologických údajoch o ľuďoch.

6.1. Zhrnutie konzistentných a protichodných dôkazov

Predklinické štúdie s použitím zvieracích modelov konzistentne preukazujú, že ELF-EMF môžu ovplyvniť funkciu rôznych endokrinných žliaz. Medzi tieto účinky patrí potlačenie produkcie melatonínu v epifýze [13], modulácia hladín stresových hormónov prostredníctvom osi hypotalamus-hypofýza-nadobličky (HPA) [4], zmeny hladín hormónov štítnej žľazy a morfológie žľazy [17] a poruchy reprodukčných hormónov a parametrov plodnosti v pohlavných žľazách [2]. Na bunkovej úrovni boli široko navrhnuté a podporované dva primárne mechanizmy: indukcia oxidačného stresu prostredníctvom zvýšenej produkcie reaktívnych foriem kyslíka (ROS) a modulácia iónových kanálov, najmä tých, ktoré regulujú homeostázu vápnika. Mechanistické štúdie ďalej naznačujú, že vzťah medzi expozíciou EMF a biologickými účinkami môže sledovať nelineárny, hormonálny vzorec – kde nízke dávky môžu spustiť adaptívne alebo dokonca prospešné reakcie, zatiaľ čo vyššie dávky sú škodlivé [4]. Na rozdiel od konzistentných zistení na zvieracích a in vitro modeloch zostávajú epidemiologické údaje o ľuďoch obmedzené a často protirečivé [35]. Niektoré nedávne metaanalýzy uvádzajú súvislosti medzi vystavením ELF-EMF a nepriaznivými reprodukčnými výsledkami, ako je znížená kvalita spermií alebo nepriaznivé výsledky pri pôrode [24]. Iné autoritatívne recenzie však tieto súvislosti konzistentne nepotvrdzujú.

štúdie [15]. Zatiaľ čo niektoré observačné štúdie naznačujú všeobecné endokrinné poruchy u exponovaných populácií [32], hlavné zdravotnícke agentúry a expertné orgány vo všeobecnosti prijímajú opatrnú interpretáciu kvôli nedostatku, variabilite a metodologickým obmedzeniam dostupných údajov o ľuďoch [5]. Konzistentné mechanistické a zvieracie zistenia v kontraste s nekonzistentnými epidemiologickými údajmi o ľuďoch poukazujú na problém „signálu k šumu" v štúdiách na ľuďoch. Biologický signál účinkov EMF, hoci je potenciálne reálny, sa zdá byť ťažko konzistentne detekovateľný uprostred vysokej variability, ktorá je vlastná skutočným ľudským populáciám, množstva mätúcich faktorov a nepresnosti meraní expozície. Táto situácia nemusí nevyhnutne vyvrátiť existenciu účinku, ale skôr naznačuje značnú zložitosť jeho štúdia vo voľne žijúcich ľudských populáciách.

6.2. Metodologické obmedzenia a potreba štandardizovaného výskumu

Opakujúca sa téma „obmedzených a protichodných údajov" v štúdiách na ľuďoch zdôrazňuje základné metodologické výzvy, ktoré je potrebné riešiť, aby sa v tejto oblasti dosiahol pokrok.

Hlavným obmedzením je ťažkosť pri presnom posúdení dlhodobej, nízkoúrovňovej expozície ľudí elektromagnetickým poliam v reálnych prostrediach [36]. Väčšina štúdií neobsahuje osobné merania a spolieha sa na ukazovatele, ktoré nemusia presne odrážať individuálne úrovne expozície. Okrem toho, štúdie na ľuďoch majú problém adekvátne kontrolovať množstvo ďalších environmentálnych, životných a genetických faktorov, ktoré významne ovplyvňujú endokrinné zdravie, čo sťažuje izoláciu špecifických účinkov, ktoré možno pripísať elektromagnetickým poliam [24]. Nedostatočná štandardizácia metodík, expozičných parametrov a výsledných meraní v rámci štúdií ďalej prispieva k protichodným výsledkom, čo bráni porovnateľnosti a schopnosti efektívne syntetizovať zistenia [6]. Inherentná komplexnosť nelineárnych a hormetických EMF efektov [4] tiež znamená, že jednoduché lineárne modely závislosti dávky od reakcie sú často nedostatočné, čo komplikuje presné posúdenie rizika. Boli identifikované špecifické medzery vo výskume, vrátane potreby pochopiť účinky vystavenia EMF na transportéry hormónov štítnej žľazy, genomické a negenomické pôsobenie a adaptované biologické reakcie [3]. Na pevné stanovenie interakčných mechanizmov s využitím štandardizovaných expozičných podmienok a optimalizovaných bunkových línií je potrebný ďalší výskum s konečným cieľom umožniť extrapoláciu na modely in vivo [15].

Prekonanie týchto výziev si vyžaduje nielen zvýšenie počtu štúdií, ale aj implementáciu sofistikovanejších a integrovanejších výskumných prístupov. To zahŕňa vývoj vylepšených technológií monitorovania osobnej expozície, navrhovanie robustných longitudinálnych kohortových štúdií s podrobným sledovaním zdravotného stavu a potenciálnu integráciu „omických" prístupov (napr. genomika, proteomika a metabolomika) na identifikáciu jemných biologických zmien a biomarkerov expozície a účinku. Okrem toho, aby bolo možné plne charakterizovať zmeny „nastavených hodnôt" a fenomény hormézy, experimentálne návrhy musia preskúmať širší rozsah dávok a expozičných vzorcov a ísť nad rámec zjednodušených porovnaní vysokých a nízkych dávok. Budúci výskum musí uprednostniť interdisciplinárne prístupy, kombinujúce pokročilé bioinžinierstvo pre presné hodnotenie expozície so sofistikovanými biologickými a epidemiologickými metódami. To zahŕňa vývoj štandardizovaných protokolov, skúmanie nelineárnych modelov dávka-odozva a zameranie sa na dlhodobé expozície na nízkej úrovni s cieľom poskytnúť definitívnejšie odpovede týkajúce sa vplyvu ENF-EMF na ľudský endokrinný systém.

6.3. Dôsledky pre verejné zdravie a regulačné aspekty

Vedecká neistota týkajúca sa vplyvu ELF-EMF na endokrinný systém predstavuje významnú výzvu pre politiku verejného zdravia a regulačné orgány. Verejnosť má rozsiahle obavy týkajúce sa potenciálnych zdravotných dôsledkov EMF [37], často ovplyvnené správami médií a zisteniami zo štúdií na zvieratách. Oficiálne agentúry, ako napríklad Vedecký výbor pre vznikajúce a novo identifikované zdravotné problémy, však

Výbor pre environmentálne riziká (SCENIHR) a Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) často tvrdia, že pri úrovniach expozície pod stanovenými limitmi sa nepreukázal žiadny vplyv na zdravie [38]. Významným regulačným aspektom je absencia zdravotných noriem pre dlhodobé vystavenie ľudí poliam VLF a ELF v Spojených štátoch. Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) klasifikovala magnetické polia ELF ako „potenciálne karcinogénne pre ľudí“ (skupina 2B), a to predovšetkým na základe pozorovaní súvisiacich s detskou leukémiou [39,40]. Hoci táto klasifikácia vyvoláva obavy, odráža obmedzené dôkazy a uznáva nekonzistentnosť a nepresnosť podkladových údajov [41]. Niektoré agentúry a štúdie často uplatňujú zásadu predbežnej opatrnosti, čo vyvoláva obavy týkajúce sa súčasných limitov expozície v dôsledku faktorov, ako sú spoločné vystavenie iným látkam, individuálna citlivosť na elektromagnetické polia a kumulatívny vplyv rozsiahleho vystavenia sa elektromagnetickým poliam [42]. Táto perspektíva naznačuje, že aj bez definitívneho dôkazu o škodlivosti môže byť opodstatnený opatrný prístup k znižovaniu expozície, vzhľadom na všadeprítomnú povahu týchto polí a mechanistickú pravdepodobnosť ich biologickej aktivity. Komplexnosť ešte zhoršuje dvojaká povaha elektromagnetických polí: hoci existujú obavy z potenciálneho poškodenia, ELF-EMF sa vďaka svojim priaznivým účinkom využívajú aj vo fyzioterapii pri rôznych ochoreniach [11]. Táto terapeutická aplikácia, často s nízkou intenzitou, ktorá môže vyvolať hormonálne reakcie, ďalej komplikuje naratív verejného zdravia a regulačné rozhodovanie. Rozdiel medzi záujmom verejnosti a regulačnou opatrnosťou, spolu s potenciálom nepriaznivých aj priaznivých účinkov v závislosti od parametrov expozície, vytvára pre tvorcov politík zložitú situáciu. Musia vyvážiť potenciálne riziká s výhodami moderných technológií, často bez absolútneho vedeckého konsenzu. Vzhľadom na všadeprítomnú expozíciu a mechanistickú vierohodnosť môže byť preto opodstatnený opatrný prístup zahŕňajúci zásadu predbežnej opatrnosti. Súčasne sú nevyhnutné ďalšie investície do robustného a transparentného výskumu, aby sa poskytli jasnejšie dôkazy pre spresnenie hodnotenia rizika a vývoj usmernení založených na dôkazoch, ktoré chránia verejné zdravie a zároveň využívajú priaznivé aplikácie elektromagnetických polí.

Základnou výzvou v oblasti bioelektromagnetiky je rozdiel medzi pozorovanými biologickými účinkami a kritériami používanými na stanovenie medzinárodných bezpečnostných noriem (ICNIRP a IEEE). Súčasné smernice pre ELF-EMF sú stanovené s cieľom predchádzať akútnym účinkom, predovšetkým stimulácii tkanív centrálneho nervového systému prostredníctvom indukovaných vnútorných elektrických polí. Väčšina endokrinných účinkov skúmaných v tejto štúdii je však podprahovej a netepelnej povahy. Tieto účinky sa prejavujú pri intenzitách výrazne nižších, ako sú intenzity potrebné na vyvolanie nervovej stimulácie alebo zahriatia tkaniva. To naznačuje, že existujúce štandardy, hoci sú účinné pri prevencii akútneho poškodenia, nemusia chrániť pred dlhodobými, nízkoúrovňovými environmentálnymi expozíciami, ktoré ovplyvňujú endokrinnú homeostázu prostredníctvom biochemických dráh, ako je oxidačný stres a modulácia iónových kanálov.

7. Závery

Vedecká literatúra o vplyve elektromagnetických polí pod 100 kHz na endokrinný systém odhaľuje komplexnú a stále sa vyvíjajúcu oblasť výskumu. Predklinické štúdie, vrátane in vivo zvieracích modelov aj in vitro bunkových experimentov, zaznamenali celý rad biologických reakcií potenciálne spojených s expozíciou ELF-EMF. Tieto pozorovania zahŕňajú hlásené zmeny v sekrécii melatonínu z epifýzy, zmeny v osi hypotalamus-hypofýza-nadobličky (HPA) a hladiny stresových hormónov, modifikácie v produkcii hormónov štítnej žľazy a morfológii žliaz, ako aj účinky na funkciu pohlavných žliaz a reprodukčné hormóny. Na vysvetlenie týchto pozorovaní bolo navrhnutých niekoľko mechanizmov vrátane oxidačného stresu sprostredkovaného tvorbou reaktívnych foriem kyslíka a moduláciou iónových kanálov, najmä zahŕňajúcou homeostázu vápnika. Presný biologický význam a reprodukovateľnosť týchto mechanizmov však zostávajú predmetom diskusie.

Koncept nelineárnych vzťahov medzi dávkou a odozvou vrátane hormézy ďalej komplikuje interpretáciu dostupných údajov, čo naznačuje, že biologické reakcie môžu silne závisieť od expozičných parametrov a experimentálnych podmienok.

Napriek zisteniam publikovaným v experimentálnych štúdiách, epidemiologický výskum na ľuďoch predstavuje podstatne menej konzistentný obraz. Nedostatok reprodukovateľných údajov o ľuďoch spolu s metodologickými obmedzeniami, ako sú ťažkosti s hodnotením dlhodobej expozície, kontrola mätúcich premenných a etické obmedzenia spojené s experimentovaním na ľuďoch, vytvára významnú translačnú medzeru medzi experimentálnymi a klinickými pozorovaniami. V dôsledku toho súčasné dôkazy neumožňujú vyvodiť definitívne závery týkajúce sa kauzálnych vzťahov medzi expozíciou nízkofrekvenčným EMP a nepriaznivými účinkami na zdravie ľudí súvisiacimi s endokrinným systémom.

Treba tiež zdôrazniť, že obmedzené alebo nekonzistentné dôkazy nemusia nevyhnutne znamenať absenciu biologickej interakcie, ale môžu čiastočne odrážať metodologickú zložitosť expozimetrického výskumu. Historická reklasifikácia látok, ako je káva, agentúrou IARC ilustruje, ako sa môže vedecká interpretácia vyvíjať so zlepšovaním metodologickej kvality a charakterizácie expozície. Ďalší pokrok v tejto oblasti preto bude pravdepodobne závisieť nielen od zvýšenia počtu štúdií, ale aj od zlepšenia kvality, reprodukovateľnosti a štandardizácie metód hodnotenia expozície.

Súčasná vedecká neistota predstavuje výzvy pre interpretáciu verejného zdravia aj pre regulačné hodnotenie. Zatiaľ čo verejné obavy týkajúce sa vystavenia ELF-EMF pretrvávajú, oficiálne organizácie ako ICNIRP a IEEE vo všeobecnosti dospeli k záveru, že konzistentné nepriaznivé účinky na zdravie neboli presvedčivo preukázané pri úrovniach expozície pod súčasnými limitmi. Klasifikácia extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí ako „potenciálne karcinogénnych pre ľudí“ zo strany IARC odráža existenciu obmedzených dôkazov a potrebu pokračujúceho vedeckého výskumu, a nie potvrdenia kauzálneho vzťahu. Na zníženie existujúcich neistôt by budúci výskum profitoval z prísnejších a harmonizovanejších metodík vrátane zlepšeného monitorovania osobnej expozície, dobre navrhnutých longitudinálnych štúdií a integrácie moderných molekulárnych a multiomických prístupov schopných odhaliť jemné biologické reakcie. Ďalšie skúmanie nelineárnych vzťahov medzi dávkou a reakciou a účinkov špecifických pre expozíciu môže tiež prispieť k lepšiemu pochopeniu pozorovaných javov. V konečnom dôsledku je potrebný pokračujúci kvalitný výskum na ďalšie objasnenie možného vplyvu ELF-EMF na endokrinný systém a na podporu hodnotenia rizika založeného na dôkazoch.

Príspevky autorov: Konceptualizácia, PMT a LSL; metodológia, PMT a LSL; validácia, PMT a LSL; formálna analýza, PMT, LSL, GR a MC; skúmanie, PMT a LSL; softvér, LSL; zdroje, PMT, LSL a GR; kurátorstvo údajov, PMT, LSL a MC; písanie – príprava pôvodného návrhu, PMT; písanie – kontrola a úprava, PMT, LSL, GR a MC; vizualizácia, LSL; dohľad, GR; administrácia projektu, GR Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie: Tento výskum nezískal žiadne externé financovanie.

Vyhlásenie inštitucionálnej revíznej komisie: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o informovanom súhlase: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov: Keďže táto práca je prehľadovým článkom, počas písania tohto článku neboli generované žiadne nové primárne údaje. Základné údaje uvedené v rukopise pochádzajú z verejne dostupných repozitárov, ako napríklad „Web of Science“ alebo „SCOPUS“.

Konflikty záujmov: Autori nemajú žiadny konflikt záujmov.

Skratky

V tomto rukopise sa používajú nasledujúce skratky:

ELF-EMF	Extrémne nízkofrekvenčné elektromagnetické
Klimatizácia	polia Striedavý prúd
HPA	Os hypotalamus-hypofýza-nadobličky Os
Ručne vyrábané vysokozdvižné vozíky	hypotalamus-hypofýza-štítna žľaza Web
WoS	of Science
SCENIHR	Vedecký výbor pre vznikajúce a novo identifikované zdravotné riziká
CRH (Centrálne zdravotnícke poistenie)	Hormón uvoľňujúci kortikotropín
ACTH	Adrenokortikotropný hormón
POMC	Proopiomelanokortín
(f)T4	(voľný) tyroxín
(f)T3	(bezplatný) Rádiofrekvencia
TSH	trijódtyronínu stimulujúceho
Rádiofrekvenčné	hormónu štítnej žľazy
Ľavý	Luteinizačný hormón
FSH	Folikuly stimulujúci hormón,
DNA	kyselina deoxyribonukleová
ROS	Reaktívne formy kyslíka
OS	Oxidačný stres
MAČKA	Kataláza
VGIC	Napäťovo riadený iónový kanálový
Atď.	elektrónový transportný reťazec
NOX	NADPH/NADH oxidázy
NOS	Syntáza oxidu dusnatého
IFO	Iónovo vynútená oscilácia
ULF EMF	Ultra-nízkofrekvenčné elektromagnetické polia
ODC	ornitín dekarboxyláza
PKC	Proteín C kináza
AK	Medzifrekvencia
ICNIRP	Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením
IARC	Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny

Referencie

1. Litzbarski, LS; Olesz, M.; Redlarski, G.; Tojza, PM; Żak, A.; Gifuni, E.; Cieślikowska, Z.; Czapliński, M. Posúdenie vplyvu nízkofrekvenčných elektromagnetických polí pochádzajúcich z energetickej infraštruktúry na ľudské zdravie.*Aplikačné vedy.* **2024**, *14*, 9668. [CrossRef]
2. Gye, MC; Park, CJ Vplyv vystavenia elektromagnetickému poľu na reprodukčný systém.*Klinické skúšky, reprodukčná medicína***2012**, *39*, 1–9. [CrossRef]
3. Zufry, H.; Rudijanto, A.; Soeatmadji, DW; Sakti, SP; Munadi, K.; Sujuti, H.; Mintaroem, K. Ovplyvňujú elektromagnetické polia významne bunky štítnej žľazy a ich funkcie? Systematický prehľad [verzia 1; odborné hodnotenie: Čaká na odborné hodnotenie].*F1000Výskum***2024**, *13*, 12. [CrossRef]
4. Klimek, A.; Kletkiewicz, H.; Siejka, A.; Wyszkowska, J.; Maliszewska, J.; Klimiuk, M.; Jankowska, M.; Seckl, J.; Rogalska, J. Nový pohľad na vplyv nízkofrekvenčného elektromagnetického poľa (50 Hz) na stresové reakcie: Hormetický efekt.*Neuroendokrinológia* **2023**, *113*, 423–441. [CrossRef] [ ]PubMed]
5. Ahlbom, A.; Bridges, J.; De Seze, R.; Hillert, L.; Juutilainen, J.; Mattsson, M.-O.; Neubauer, G.; Schüz, J.; Simko, M.; Bromen, K. Možné účinky elektromagnetických polí (EMF) na ľudské zdravie – stanovisko vedeckého výboru pre vznikajúce a novo identifikované zdravotné riziká (SCENIHR).*Toxikológia***2008**, *246*, 248–250.
6. Kim, H.-Y.; Son, Y.; Jeong, YJ; Lee, S.-H.; Kim, N.; Ahn, YH; Jeon, SB; Choi, H.-D.; Lee, H.-J. Účinky dlhodobých evolučných elektromagnetických polí 4G na dysfunkciu hormónov štítnej žľazy a zmeny správania u dospievajúcich samcov myší.*Medzinárodný časopis mol. vedy.***2024**, *25*, 875. [CrossRef] [ ]PubMed]
7. Miro, L. Biologické účinky elektromagnetických polí. In Zborník z 12. medzinárodného sympózia a výstavy o elektromagnetickej kompatibilite EMC vo Vroclave, Vroclav, Poľsko, 28. júna – 1. júla 1994; Zväzok 1994, str. 6–12. [CrossRef]

8. van Eck, NJ; Waltman, L. Vosviewer Online. 2010. Dostupné online:https://web.vosviewer.com/(prístup 20. februára 2026).
9. Ouzzani, M.; Hammady, H.; Fedorowicz, Z.; Elmagarmid, A. Rayyan – webová a mobilná aplikácia pre systematické prehľady.*Syst. Rev.* **2016**,*5*, 210. [CrossRef]
10. Morabito, C.; Di Sinno, N.; Mariggiò,MA; Guarnieri, S. Vplyv extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na kostrové svalstvo sedavých dospelých myší: Pilotná štúdia.*Medzinárodný časopis mol. vedy.***2024**,*25*, 9857. [CrossRef] [ ]PubMed]
11. Karasek, M.; Woldanska-Okonska, M. Elektromagnetické polia a ľudský endokrinný systém.*Vedecký svet J.***2004**,*4*, 23–28. [CrossRef]
12. Lawand, N.; Jammoul, M. Melatonín: Potenciálny štít proti elektromagnetickým vlnám.*Curr. Neuropharmacol.***2022**,*20*, 648–660. [CrossRef]
13. Manda, D.; Ionescu, M.; Vladoiu, S.; Ianaş, O. Účinky nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na melatonín v epifýze u myší.*Rím. J. Endocrinol.***2000**,*38*, 11–16.
14. Hong, ME; Yoon, KH; Jung, YY; Lee, TJ; Park, ES; Sohn, UD; Jeong, JH Vplyv vystavenia extrémne nízkofrekvenčnému magnetickému poľu na neuroendokrinné bunky a hormóny v žalúdku potkanov.*Kórejský časopis fyziológie. Farmacol.***2011**,*15*, 137–142. [CrossRef] [ ] PubMed]
15. Vedecký výbor pre zdravie, životné prostredie a vznikajúce riziká (SCHEER).*Potenciálne zdravotné účinky vystavenia elektromagnetickým poliam (EMF): Aktualizácia s ohľadom na frekvencie medzi 1 Hz a 100 kHz*Európska komisia: Brusel, Belgicko, 2025. [CrossRef]
16. Prochnow, N.; Gebing, T.; Ladage, K.; Krause-Finkeldey, D.; El Ouardi, A.; Bitz, A.; Streckert, J.; Hansen, V.; Dermietzel, R. Vplyv elektromagnetického poľa alebo len stres? Účinky vystavenia UMTS na dlhodobú plasticitu hipokampu v kontexte uvoľňovania hormónov súvisiacich s procedúrou.*PLoS ONE***2011**,*6*, e19437. [CrossRef]
17. Ebrahimi, MR; Seraj, M.; Majidzadeh, AK; Khoshdel, A.; Shahmiri, H. Účinky extrémne nízkofrekvenčného elektromagnetického poľa na depresiu, úzkosť, hormóny štítnej žľazy a génovú expresiu u myší.*Zákon. Nerv. Super. Obnova***2019**,*61*, 2019.
18. Kitaoka, K.; Kitamura, M.; Aoi, S.; Shimizu, N.; Yoshizaki, K. Chronické vystavenie extrémne nízkofrekvenčnému magnetickému poľu vyvoláva u myší správanie podobné depresii a sekréciu kortikosterónu bez zosilnenia osi hypotalamus-hypofýza-nadobličky. *Bioelektromagnetika***2013**,*34*, 43–51. [CrossRef]
19. Mahdavi, SM; Sahraei, H.; Yaghmaei, P.; Tavakoli, H. Účinky vystavenia elektromagnetickému žiareniu na správanie súvisiace so stresom a stresové hormóny u samcov potkanov kmeňa Wistar.*Biomol. Ther.***2014**,*22*, 570–576. [CrossRef]
20. Výbor Národnej rady pre výskum (USA) pre posudzovanie možných zdravotných účinkov siete pre núdzové situácie súvisiace s prízemnými vlnami (GWEN).*Posúdenie možných zdravotných účinkov núdzovej siete pre prípady pozemných vĺn*; National Academies Press (USA): Washington, DC, USA, 1993. [CrossRef]
21. Hosseinabadi, MB; Khanjani, N.; Ebrahimi, MH; Haji, B.; Abdolahfard, M. Vplyv chronického vystavenia extrémne nízkofrekvenčným elektromagnetickým poliam na kvalitu spánku, stres, depresiu a úzkosť.*Elektromagnetická biológia a medicína***2018**,*38*, 96–101. [CrossRef]
22. Karimi, A.; Moghaddam, FG; Valipour, M. Poznatky o biológii vystavenia extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam na ľudské zdravie.*Mol. Biol. Rep.***2020**,*47*, 5621–5633. [CrossRef] [ ]PubMed]
23. Jung, K.-A.; Ahn, H.-S.; Lee, Y.-S.; Gye, M.-C. Vplyv vystavenia pílovitému magnetickému poľu s frekvenciou 20 kHz na estrálny cyklus u myší.*J. Microbiol. Biotechnol.***2007**,*17*, 398–402.
24. Lamzouri, O.; Laamara, R. Zdravotné riziká nízkofrekvenčných elektromagnetických polí (LF-EMF) a rádiových vĺn: Súhrnný prehľad a metaanalýza.*Výstavné námestie***2024**. [ ]CrossRef]
25. Asghari, A.; Khaki, AA; Rajabzadeh, A.; Khaki, A. Prehľad elektromagnetických polí (EMF) a reprodukčného systému. *Elektrónový lekár***2016**,*8*, 2655–2662. [CrossRef]
26. Suri, S.; Dehghan, SF; Sahlabadi, AS; Ardakani, SK; Moradi, N.; Rahmati, M.; Tehrani, FR Vzťah medzi vystavením extrémne nízkofrekvenčnému (ELF) magnetickému poľu a hladinou niektorých reprodukčných hormónov u pracovníkov elektrární.*J. Occup. Health***2020**,*62*, 12173. [CrossRef]
27. Eskandani, R.; Zibaii, MI Odhalenie biologických účinkov rádiofrekvenčných a extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na funkciu centrálneho nervového systému.*Bioimpakty***2024**,*14*, 30064. [CrossRef]
28. Belpomme, D.; Campagnac, C.; Irigaray, P. Spoľahlivé biomarkery ochorení charakterizujúce a identifikujúce elektrohypersenzitivitu a viacnásobnú chemickú citlivosť ako dva etiopatogénne aspekty jedinečnej patologickej poruchy.*Rev. Environment. Zdravie***2015**,*30*, 251–271. [CrossRef]
29. Kivrak, E.; Yurt, K.; Kaplan, A.; Alkan, I.; Altun, G. Účinky vystavenia elektromagnetickým poliam na antioxidačný obranný systém. *J. Microsc. Ultrastruct.***2017**,*5*, 167–176. [CrossRef]
30. Panagopoulos, DJ; Yakymenko, I.; De Iuliis, GN; Chrousos, GP Komplexný mechanizmus biologických a zdravotných účinkov antropogénnych extrémne nízkofrekvenčných a bezdrôtových komunikačných elektromagnetických polí.*Verejné zdravie***2025**, *13*, 1585441. [CrossRef] [ ]PubMed]

31. Reale, M.; Kamal, MA; Patruno, A.; Costantini, E.; D'ANelo, C.; Pesce, M.; Greig, NH Neuronálne bunkové reakcie na vystavenie extrémne nízkofrekvenčnému elektromagnetickému poľu: Dôsledky týkajúce sa oxidačného stresu a neurodegenerácie. *PLoS ONE***2014**, *9*, e104973. [CrossRef] [ ]PubMed]
32. Inštitút funkčnej medicíny. Dostupné online:https://www.ifm.org/articles/emf-health-reducing-exposures(prístup 20. februára 2026).
33. Panagopoulos, DJ; Karabarbounis, A.; Margaritis, LH Mechanizmus pôsobenia elektromagnetických polí na bunky.*Biochem. Biofyz. Výskum. Spoločen*.**2002**, *298*, 95–102. [CrossRef] [ ]PubMed]
34. Marino, AA; Wolcott, RM; Chervenak, R.; Jourd'hEuil, F.; Nilsen, E.; Ii, CF; Pruett, SB Súbežné nelineárne zmeny v endokrinnom a imunitnom systéme v dôsledku nízkofrekvenčných magnetických polí.*Neuroimunomodulácia***2001**, *9*, 65–77. [CrossRef]
35. Popov, P. Účinky nízkofrekvenčného elektromagnetického poľa na ľudské telo.*Ved. bull. nav. akad*.**2016**, *19*, 256–259. [CrossRef]
36. Rada Európskej únie. Odporúčanie Rady z 12. júla 1999 o obmedzení vystavenia verejnosti elektromagnetickým poliam (0 Hz až 300 GHz) (1999/519/ES).*Úradný zborník európskych spoločenstiev***1999**, *L199*, 59–70.
37. Redlarski, G.; Lewczuk, B.; Żak, A.; Končický, A.; Krawczuk, M.; Piechocki, J.; Jakubiuk, K.; Tojza, P.; Jaworski, J.; Ambroziak, D.; a kol. Vplyv elektromagnetického znečistenia na živé organizmy: historické trendy a zmeny predpovedí.*Medzinárodný výskumný ústav BioMed* **2015**, *2015*, 34098. [CrossRef] [ ]PubMed]
38. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením. Pokyny na obmedzenie vystavenia časovo premenlivým elektrickým a magnetickým poliam (1 Hz až 100 kHz).*Zdravotná fyzika*.**2010**, *99*, 818–836. [CrossRef] [ ]PubMed]
39. Dostupné online:https://www.iarc.who.int(prístup 10. marca 2026).
40. Klasifikácia statických a extrémne nízkofrekvenčných elektrických a magnetických polí IARC (zväzok 80 série monografií IARC).*J. Radiol. Prot*.**2001**, *21*, 313. [CrossRef]
41. Rayyan. Dostupné online:https://www.rayyan.ai/(prístup 10. februára 2026).
42. Boehmert, C.; Verrender, A.; Pauli, M.; Wiedemann, P. Spúšťajú preventívne informácie o elektromagnetických poliach nocebo reakcie? Experimentálna štúdia komunikácie rizika.*Životné prostredie. Zdravie***2018**, *17*, 36. [CrossRef]

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