



## International Journal of Radiation Biology

ISSN: (Tlač) (Online) Domovská stránka časopisu: [www.tandfonline.com/journals/irab20](http://www.tandfonline.com/journals/irab20)

# Mechanistické chápanie ľudskej magnetorecepce potvrdzuje fenomén elektromagnetickej hypersenzitivity (EHS)

Denis L. Henshaw & Alasdair Philips

**Ak chcete citovať tento článok:** Denis L. Henshaw & Alasdair Philips (9. decembra 2024): Mechanistické chápanie ľudskej magnetorecepce potvrdzuje fenomén elektromagnetickej hypersenzitivity (EHS), International Journal of Radiation Biology, DOI: [10.1080/09553002.2024.2435329](https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2435329)

**Odkaz na tento článok:** <https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2435329>



© 2024 Autor(i). Vydané s licenciou spoločnosťou Taylor & Francis Group, LLC.



Zverejnené online: 9. decembra 2024.



Odošlite svoj článok do tohto časopisu 




Počet zobrazení článku: 1568



Zobraziť súvisiace články 



Zobrazenie údajov križových značiek 

# Mechanistické chápanie ľudskej magnetorecepcie potvrdzuje fenomén elektromagnetickej hypersenzitivity (EHS)

Denis L. Henshaw<sup>a</sup>  a Alasdair Philips<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>atmospheric Chemistry group, School of Chemistry, University of Bristol, Bristol, UK; <sup>b</sup>Nezávislý vedec, Brambling, Beeswing, dumfries, Škótsko, Spojené kráľovstvo

## ABSTRAKT

**Pozadie:**Symptómy ľudskej elektromagnetickej hypersenzitivity (EHS) alebo elektrosenzitivity (ES) v reakcii na antropogénne elektromagnetické polia (EMF) na úrovni nižšej, ako sú súčasné medzinárodné bezpečnostné štandardy, sú konvenčnou medicínou všeobecne považované za nocebo efekty. V širšej oblasti magnetorecepcie v biológii je naše chápanie mechanizmov a procesov interakcií magnetického poľa (MF) pokročilejšie.

**Metódy:**Konzultovali sme celý rad databáz publikácií, aby sme identifikovali kľúčové pokroky v chápaní magnetorecepcie v rámci širokej živočíšnej ríše.

**Výsledky:**Skúmali sme primárne snímanie MF/EMF a následné spojenie s nervovým systémom a mozgom. Častice magnetitu v našom mozgu a iných tkanivách môžu prenášať MF/EMF, a to aj na mikrovlnných frekvenciách. Mechanizmus radikálových párov (RPM) je akceptovaný ako hlavný základ magnetického kompasu u vtákov a iných druhov, ktorý pôsobí prostredníctvom molekúl kryptochrómových proteínov v oku. V niektorých prípadoch sa pozoruje mimoriadna citlivosť, niekoľkokrát nižšia ako citlivosť geomagnetického poľa. Dezorientácia vtáčieho kompasu v dôsledku rádiofrekvenčných (RF) EMP je známa. **Záver:**Interdisciplinárny výskum ukázal, že všetky formy života môžu reagovať na MF. Výskum ukazuje, že ľudské kryptochrómy vykazujú magnetosenzitivitu. Väčšina existujúcich provokačných štúdií nepotvrdila EHS ako environmentálnu chorobu. Pripisujeme to zásadnému nepochopeniu príslušných mechanizmov a procesov, ktoré vyústili do návrhu nevhodných a neadekvátnych testov. Dospeli sme k záveru, že budúci výskum EHS si vyžaduje kvantový mechanistický prístup na základe existujúcich biologických poznatkov magnetosenzitivity živých organizmov.

**skratky:**CRY: molekuly kryptochrómového proteínu vyjadrené (italizované) *PLAČIŤ* alebo *plakatý*; hCRY: ľudský kryptochróm; DECT: Digitálne rozšírené bezdrôtové telekomunikácie (bezdrôtový štandard); EF(s): elektrické pole(a); ES: elektrosenzitivita; EHS: elektromagnetická hypersenzitivita (EHS); ELF: extrémne nízko-frekvenčné magnetické polia, 3Hz až 3kHz; ELF-EMF: extrémne nízko-frekvenčné elektrické a magnetické polia, 3Hz až 3kHz; EMP: elektrické a magnetické pole (polia) alebo elektromagnetické pole (polia) (EMP sa môže vzťahovať iba na magnetickú zložku a používa sa zameniteľne s MF, čo odráža ich použitie v literatúre); EMR: elektromagnetické žiarenie; FAD: Flavin adenín dinukleotid; FADH: Flavinový radikál (FADH•); GM pole alebo GMF: geomagnetické pole; GM-búrky: geomagnetické búrky; HPA: os hypotalamus-hypofýza-nadobličky; ICNIRP: Medzinárodná komisia pre neionizujúce žiarenie; IEI-EMF: idiopatická environmentálna intolerancia pripisovaná EMP; ISCA1 (MagR): proteín podieľajúci sa na zostavovaní klastrov železo-síra; LAN: Svetlo v noci; MF(s): magnetické pole(a); PEMF: pulzné elektromagnetické polia; RF-EMF: vysokofrekvenčné elektromagnetické pole (polia); RPM: mechanizmus radikálového páru; RP(y): radikálový pár(y); ROS: reaktívne formy kyslíka; rTMS: opakovaná transkraniálna magnetická stimulácia; ST: singlet – triplet (v mechanizme RPM); Trp: tryptofán;  $\mu$ T: mikrotlesla; nT: nanotlesla; ULF-MF: ultranízko-frekvenčné magnetické polia; VGIC: napätovo riadené iónové kanály; VLF: 3–30 kHz; WHO: Svetová zdravotnícka organizácia

## HISTÓRIA ČLÁNKU

prijaté 26. septembra 2024  
revidované 8. novembra 2024  
prijaté 22. novembra 2024

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Magnetické polia; eMF; elektromagnetická precitlivosť; eHS; magnetorecepcia; kryptochrómy

## 1. Úvod

Ľudská *elektromagnetická precitlivosť* (EHS) alebo jednoducho *elektrocitlivosť* (ES), v minulosti známy ako *mikrovlnný syndróm*, je všeobecný pojem opisujúci nepriaznivé reakcie na vystavenie jednej alebo viacerým vlastnostiam *elektromagnetizmu* (Schliephake 1932). Patria medzi ne aj časové premenné *elektrické polia*

(EF), *magnetické polia* (MF), *extrémne nízko-frekvenčné elektrické a magnetické polia* (ELF-EMF), ako sú tie, ktoré súvisia s elektrickými vedeniami, *arádiorefekvenčné elektromagnetické polia* (RF-EMF) z moderných bezdrôtových zariadení, ako sú mobilné telefóny, spolu s ich *elektromagnetickým žiarením* (EMR).

Čoraz väčší počet ľudí (okolo 3 %) tvrdí, že sú citliví na tieto umelo vytvorené látky *časovo premenlivé EMP*,

**KONTAKT** denis l. Henshaw  [dlhenshaw@bris.ac.uk](mailto:dlhenshaw@bris.ac.uk)  atmospheric Chemistry group, School of Chemistry, University of Bristol, Bristol, Spojené kráľovstvo  
© 2024 autor(i). Vydané s licenciou spoločnosťou Taylor & Francis group, LLC.

toto je článok s otvoreným prístupom distribuovaný v súlade s podmienkami licencie Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), ktorý umožňuje neobmedzené používanie, distribúciu a reprodukciu na akomkoľvek médiu za predpokladu, že pôvodné dielo je riadne citované, podmienky, za ktorých bol tento článok publikovaný, umožňujú uverejnenie prijatého Rukopisu v úložisku autorom (autorov) alebo s ich súhlasom.

najmä na rádiových frekvenciách. Hlásené symptómy EHS sú široké a zahŕňajú bolesti hlavy, tinitus, únavu a kožné symptómy, ako je pichanie, pocity pálenia a vyrážky. Tieto reakcie sa vyskytujú pri úrovniach vystavenia hlboko pod prirodzenou silou MF Zeme a mnoho rádov pod súčasnými medzinárodnými smernicami pre vystavenie EMP (Obrázky 1a2, Príloha A) (ICNIRP2010,2020; IEEE2019).

Konvenčná lekárska veda zvyčajne pripisuje symptómy EHS ako psychologicky riadené „*elektrofóbia*“ alebo „*noceboodpoveď*“. Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) v súčasnosti uvádza, že „*EHS nemá žiadne jasné diagnostické kritériá a neexistuje žiadny vedecký základ na spojenie symptómov EHS s expozíciou EMP*“. Tento termín používa WHO *idiopatická environmentálna intolerancia pripisovaná EMP* (IEI-EMF) (WHO2005).

Väčšina subjektívnych provokačných štúdií nepotvrdila EHS ako environmentálnu chorobu. Zásadné nepochopenie príslušných mechanizmov a procesov však vyústilo do návrhu úplne nevhodných provokačných testov (Leszczynski2022) a pri neudržateľnej interpretácii ich zistení (Bosch-Capblanch et al.2024).

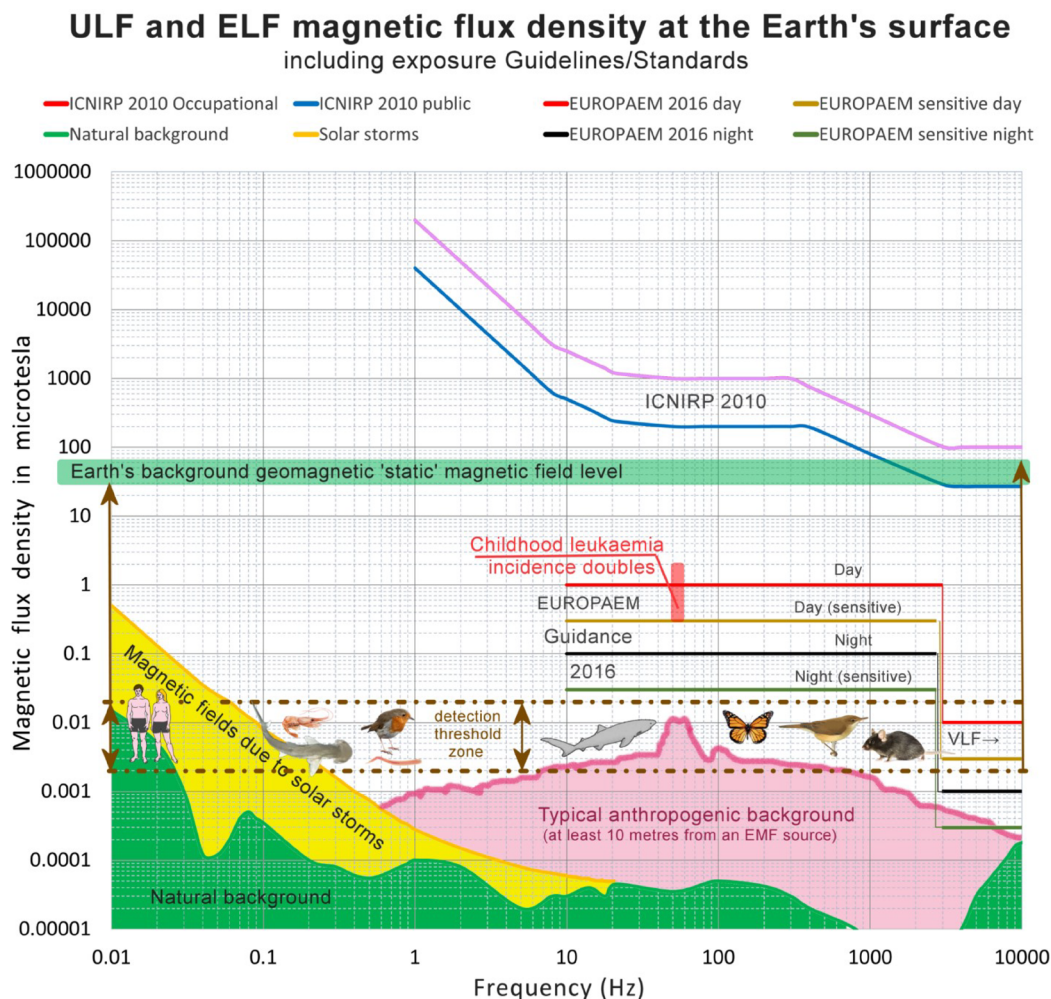
Interdisciplinárny výskum u mnohých druhov zistil, že všetky formy života v niektorých prípadoch reagujú na MF

s mimoriadnou citlivosťou. Mnoho druhov tiež reaguje na EF, hoci súbor dostupných výskumov je obmedzený v porovnaní s tým, ktorý sa týka magnetorecepcie.

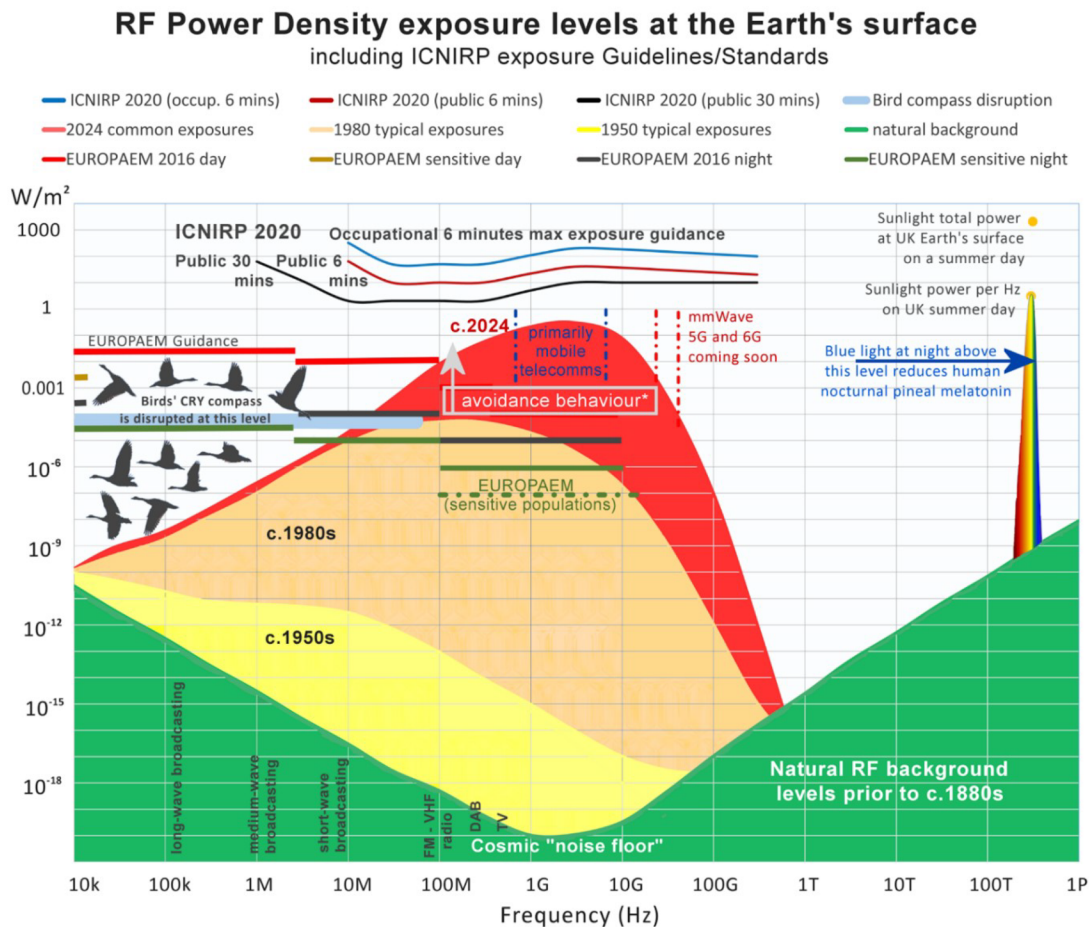
Táto štúdia skúma, či je EHS u ľudí syndróm, ktorý nepriaznivo ovplyvňuje blaho človeka spôsobené environmentálnymi expozíciami, a ak áno, akým mechanizmom (mechanizmami) k nemu dochádza. Kladieme si tieto kľúčové otázky:

- i. *Ako sú niektoré živé organizmy vrátane ľudí citlivé na EMP z prírodných a antropogénnych zdrojov na úrovniach výrazne pod v podstate statickým geomagnetickým (GM) poľom medzi 23 a 65 mikrottesla ( $\mu T$ ) a mnoho rádov pod súčasnou úrovňou usmernení pre expozíciu ľudí?*
- ii. *Áké sú biofyzikálne procesy, ktorými možno snímať signály EMF?*
- iii. *Ktoré biologické procesy zodpovedajú za reakcie na expozíciu?*
- iv. *Ktorý z týchto faktorov môže súvisieť s ľudskou elektromagnetickou precitlivosťou (EHS)?*

Podrobným preskúmaním najnovších systematických prehľadov epidemiologického a experimentálneho výskumu ľudí (Röösli et al.2024;



**Obrázok 1** kontextový sprievodca dC–10 kHz environmentálnymi magnetickými poľami a ich interakciami. Ilustratívne úrovne prirodzeného a antropogénneho magnetického toku sú zobrazené spolu s ICNIRP a euroPaeM maximálnymi orientačnými úrovňami expozície (ICNIRP2010; Belyaev a kol.2016). Bežné denné expozície pri 50/60 Hz sú v rozsahu 0,1–10 mikrottesla. rozsah detekcie prahu pre iné druhy je podrobne diskutovaný v texte hlavného článku. Úrovne pozadia sú odvodené z mnohých zdrojov (Itu-r P.372-162022; správa naSa Cr-1666611981; správa naSa SP-80171969).



**Obrázok 2** kontextový sprievodca eMr (10 kHz–1 PHz) vystavením hustote výkonu a interakciám. Ilustratívne antropogénne a prirodzené úrovne eMr sú uvedené za niekoľko období vo vývoji bezdrôtových komunikačných technológií spolu s ďalšími relevantnými informáciami vrátane usmerňujúcich úrovni expozície poskytnutých euroPaeM (Belyaev et al. 2016) a inými orgánmi (ICNIRP2020; IEEE2019). úrovne z roku 2024 teraz každý deň zažíva väčšina širokej verejnosti na krátke alebo dlhé obdobia. hodnoty boli zistené zo širokej škály zdrojov, vrátane vedeckých a inžinierskych prác, formálnych rf prieskumov a meraní v teréne, ktoré vykonal spoluautor alasdair Philips. pre *vyhýbavé správanie* pozri Pophof a kol. (2023). Úrovne pozadia sú odvodené z mnohých zdrojov (Itu-r P.372-162022; Kraus a Fleisch1999; správa naSa Cr-1666611981; správa naSa SP-80171969). prirodzené atmosférické vysokofrekvenčné úrovne pri niektorých frekvenciách sú relatívne vysoké blízko rovnika (granger et al.2022).

Bosch-Capblanch a kol.2024; Schmiedchen a kol.2019), zistíme, že nie sú vhodné na daný účel. Hlavným problémom je obrovská heterogenita moderných antropomorfných expozícií a výsledkov, čo znemožňuje hodnotiť tieto štúdie ako celkovú skupinu. Toto sa zhoršuje neadekvátnym meraním a hlásením príslušných MF (frekvencia, sila a morfológia). Okrem toho nedostatočná elektromagnetická hygiena používaná pri falošných expozíciách v experimentálnych štúdiách, najmä s ohľadom na zložité zmesi EMP signálov, vedie k nekontrolovaným expozíciám, ktoré pôsobia len ako mätúce.

Základný návrh mnohých štúdií na ľuďoch je často založený na dokumentoch s usmerneniami o expozícii EMF ICNIRP, ktoré uznávajú iba expozície, ktoré spôsobujú tepelné účinky alebo elektrický šok. (ICNIRP2010,2020; IEEE2019).

### 1.1. Metodika výberu štúdií

Ústredným cieľom tejto štúdie je identifikovať kľúčové pokroky v chápaní mechanizmov magnetorecepcie v celej ríši animalia pre širokú škálu prirodzených a antropomorfných MF v našom prostredí.

Aby sme našli vhodné štúdie, konzultovali sme Web of Science, PubMed a portál EMF. V prípade magnetorecepcie zvierat sme tiež konzultovali databázu Royal Institute of Navigation, ktorá bežne prehľadáva 78 základných časopisov. Uvádzame niektoré nedávno publikované zistenia. Takéto prípady sú diskutované ako prebiehajúce práce.

Spôsob výberu literatúry pre túto štúdiu sa líši od spôsobu výberu v oblasti epidemiológie. Nie je potrebné vážiť výsledky širokej škály heterogénnych štúdií. Po stanovení mechanistických objavov je charakteristická ich presnosť. Príkladom je mechanizmus radikálového páru (RPM), pomocou ktorého môžu MF s nízkou intenzitou meniť rýchlosti chemických reakcií a reakčné produkty. Tento mechanizmus je dobre zavedený a nevyžaduje ďalšie overovanie.

### 2. Pozadie

Od magnetotaktických baktérií až po ľudí je schopnosť reagovať na MF všadeprítomná medzi takzvanými piatimi ríšami života (Pazur et al.2007; Wang a kol.2019; Chae a kol. 2022). Mnohé druhy tiež reagujú na EF, ako aj MF



(Wever1979; Henshaw a kol.2008). Pokiaľ ide o vnímanie, vedecké dôkazy to ukazujú, že je univerzálny. Tento článok sa zaoberá predovšetkým citlivosťou MF/EMF v dôsledku vonkajších polí. Dodatočná prehľadová štúdia citlivosti EF je tiež žiaduca, ale tu sa diskutuje len stručne, pretože dostupná literatúra o interakciách EF je obmedzenejšia.

Niektoré reakcie MF sú prospešné, ako napríklad schopnosť vtákov, rýb, obojživelníkov a hmyzu detekovať zmeny v MF Zeme (geomagnetické pole [GMF]) na účely navigácie a migrácie a pri klinickom použití pulzných EMP na liečenie veľkých depresívnych porúch (Blumberger et al.2018) a hojenie nezrastených zlomenín kostí (Markov 2015). Uvádza sa však, že aj iné reakcie MF a EMP z prírodných aj antropogénnych zdrojov súvisia s nepriaznivými účinkami na zdravie a pohodu.

Počas posledných dvoch desaťročí sa hľadanie pravdepodobných kauzálnych dráh interakcií MF a EMF s biologickými systémami značne rozmohlo. Špecifickým zameraním v súvislosti s nepriaznivými účinkami na zdravie je preukázané 2-násobné zvýšenie rizika detskej leukémie spojené s časovo váženým priemerným vystavením MF nad 0,4 mikrotlesa (ELF) a v poslednom čase 1,2-násobným zvýšením riziko nad 0,2 mikrotlesa (Ahlbom et al. 2000; Grónsko a kol.2000; Zhao a kol.2014; Seomun a kol. 2021). Viacerí autori skúmali mechanickú dráhu zahŕňajúcu MF narušenie melatonínu a cirkadiánnych rytmov prostredníctvom pôsobenia na molekuly kryptochrómového proteínu v oku (Henshaw a Reiter2005; Vanderstraeten a Burda2012; Vanderstraeten a kol.2012; Henshaw a Reiter 2005; CwCUK2014; Vanderstraeten a kol.2015; Juutilainen a kol.2018; Landler a Keays2018; Sherrard a kol.2018; Henshaw a kol.2024).

Široko sa diskutuje o dvoch primárnych mechanizmoch snímania MF. Magnetické častice v ľudskom mozgu sú dostatočne veľké na to, aby preniesli MF/EMF, a to aj pri mikrovlnných frekvenciách. V niektorých prípadoch je takáto transdukcia dostatočná na otvorenie mechanicky citlivých transmembránových iónových kanálov a následne má potenciál ovplyvniť široké spektrum bunkových procesov (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, Woodford,1992; Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, Diaz-Ricci a kol. 1992). Mechanizmus kvantovo mechanicky založených radikálových párov (RPM) úspešne opísal základ magnetického kompasu vtákov a niektorých iných druhov, pôsobiacich prostredníctvom molekúl kryptochrómových proteínov v oku (Ritz et al. 2004; Pakhomov a kol.2017; Karki a kol.2021). Všeobecnejšie povedané, RPM zohráva ústrednú úlohu vo vznikajúcej oblasti *kvantová biológia*, ktorý popisuje celý rad biologických procesov, ktoré nie je možné vysvetliť klasickou fyzikou (Marais et al.2018; Zadeh-Haghighi a Simon 2022).

Takéto nedávne pokroky v chápaní znamenajú, že je načas posúdiť naše súčasné poznatky o interakcii nízkych úrovní MF a EMP s biologickými systémami. Na vyriešenie vyššie uvedených otázok sme zamerali našu pozornosť na snímanie MF alebo EMP mozgom, buď prostredníctvom priamych alebo nepriamych nervových dráh. Potom sa pokúsime zjednotiť naše chápanie v celom rade tém, od magneto-snímania u zvierat až po terapiu EMP a nepriaznivé zdravotné účinky bežne známe ako EHS. Ľudské EHS by sa malo vnímať ako osobitný prípad. Niektoré hlásené účinky môžu byť spôsobené *elektrofóbia* a sú spúšťané obavami, ale opatrne

preskúmanie dôkazov tiež naznačuje, že k účinkom skutočných expozícií dochádza prostredníctvom pravdepodobných kauzálnych mechanizmov.

Pomerne zriedkavé biologické reakcie je potrebné posudzovať v širšom kontexte. Napríklad lieky na predpis majú vo všeobecnosti uvedené vedľajšie účinky 1 z 10; 1 zo 100 alebo ešte menej. Navyše, základná maximálna citlivosť jednotlivca na svetlo, zvuk, dotyk a vôňu sa líši o mnoho rádov. Naše zmysly reagujú logaritmicke a majú významný *integrovane aktívne riadenie zisku*, ktorý sa pokúša optimalizovať citlivosť pre aktuálnu relevantnú prichádzajúcu environmentálnu expozíciu (Beckon et al.2008).

### 3. Príklady magnetického snímania

#### 3.1. Magnetorecepcia u rastlín a živočíchov, navigácia a migrácia

V súčasnosti existuje vysoký stupeň pochopenia toho, ako vtáky a niektoré ďalšie druhy zisťujú zmeny v MF Zeme už od 10 nanotesla (nT) na účely navigácie a migrácie (Pakhomov et al. 2017). Opakovane sa ukázalo, že vtáčí kompas môže byť narušený RF MHz polami v nízkom rozsahu nT. Ako je vysvetlené nižšie, veľmi diskutovaný je RPM, ktorý pôsobí na molekuly kryptochrómového proteínu v oku. Okrem toho sa predpokladá, že druhý mechanizmus založený na magnetických časticiach v tele poskytuje informácie o magnetickej intenzite u vtákov a mnohých iných druhov.

Magnetosenzitivita bola preukázaná u mnohých živočíšnych druhov. Ďalšie podrobnosti spolu s diskusiou o mechanizmoch účinku možno nájsť inde: u druhov vtákov (Wiltschko a Wiltschko2009; Wiltschko a spol. 2021), ryby (Naisbett-Jones a Lohmann 2022) a obojživelníky (Phillips et al.2022). Obzvlášť zaujímavým príkladom sú krtekrysy. Niektoré druhy trávia celý svoj život v úplnej tme, kde sú schopné použiť GMF na vytvorenie podzemného bludiska tunelov (Burda et al. 1990; Burda2021).

Mnoho druhov hmyzu je citlivých na magnety, vrátane včiel, švábov, chrobákov, ovocných mušiek, púštnych mravcov, motýľa monarcha a motýľa austrálskeho bogongského, pričom obe používajú GMF ako pomôcku pri navigácii (Merlin2023; Dreyer a kol.2018). Kryptochrómy sú prítomné v očiach a mozgu všetkého hmyzu a ich úloha ako magnetoreceptorov bola kriticky preskúmaná (Merlin2023). Identifikovalo sa množstvo biologických účinkov RF-EMF na hmyz a skúmalo sa ich spojenie s nervovým systémom (Thill et al.2024).

Rastlinné mikroorganizmy a huby tiež vykazujú magnetosenzitivitu s veľkým záujmom o ich mechanizmy (Galland a Pazur2005; Pazur a kol.2007; Thoradit a kol. 2023).

#### 3.2. Reakcie ľudí a zvierat na GM búrky

GMF hrá dôležitú úlohu v existencii života na Zemi (Sarimov et al.2023a,2023b; Zhang a kol.2021).

GM búrky sú spojené s nepriaznivými účinkami na zdravie a pohodu a 10 – 15 % populácie tsshe sa zdá byť náchylných

**Tabuľka 1.** Účinky geomagnetických búrok na ľudskú biológiu a zdravie.

| Zvýšená                                       | znížená |
|---|---------|
| depresie                                      | ↑       |
| Výskyt samovrážd                              | ↑       |
| Srdcová frekvencia a útoky na arteriálny tlak | ↑       |
| Mŕtvica                                       | ↑       |
| nočný melatonín                               | ↑↓      |
| Bazofily a leukocyty                          | ↑       |
| Cholesterol                                   | ↑       |
| Migrenózne bolesti hlavy                      | ↑       |
| Bazofily a leukocyty                          | ↑       |
| Agregácia krvných doštičiek                   | ↑       |
| koncentrácia fibrinogénu                      | ↑       |
| Rýchlosť prekrvenia kože                      | ↑       |

im (Tabuľka 1). Patrí medzi ne zvýšený výskyt depresie a účinky na duševné zdravie; zvýšené riziko samovrážd u zraniteľných jedincov; a variabilita srdcovej frekvencie, zmeny krvného tlaku, mŕtvica a porucha melatonínu (Kay 1994; Nishimura a kol. 2020; Vieira a kol. 2022; Palmer a kol. 2006; Feigin a kol. 2014; Ghione a spol. 1998; Dimitrová a kol. 2004; Azcárate a kol. 2016; Azcárate a Mendoza 2017; Burch a kol. 1999; Weydahl a kol. 2000; Burch a kol. 2008; Krylov 2017). Dva aktuálne prehľady poukazujú na rozsiahlu literatúru, ktorá v súčasnosti existuje o zdravotných účinkoch GM búrok a MF s nízkou intenzitou, vrátane veľkého príspevku výskumu v oblasti kozmickej medicíny (Sarimov et al. 2023a, 2023b).

Je pozoruhodné, že tieto akútne účinky sú spojené s malými, ultranízko-frekvenčnými variáciami MF okolo 150 nT počas 3-hodinového obdobia v GM búrkach trvajúcich až 5 dní. Ročne sa uskutoční približne 4-5 takýchto podujatí. GM búrky sú výsledkom prúdov nabitých častíc zo Slnka, ktoré sa dostanú na Zem. Na hladine mora to vedie k malým výkyvom 50 – 250 nT, čo je menej ako 1 % inak relatívne stabilného GMF (ktorý sa vo svete mení medzi ~23 a 65  $\mu$ T).

Niektoré z vyššie uvedených zistení boli preukázané v objektívnych ľudských provokačných štúdiách zahŕňajúcich zdravých dobrovoľníkov, ktorí netvrdia, že sú nepriaznivo citliví na EMP. V samostatných experimentoch boli zdraví dobrovoľníci vystavení predtým zaznamenaným GM búrkam v laboratórnych podmienkach (Caswell et al. 2016; Gurfinkel a kol. 2018; Pishchalnikova a kol. 2019). V každom experimente boli pozorované štatisticky významné zmeny kardiovaskulárnych parametrov v porovnaní s vystavením pokojným podmienkam GMF.

Podobné provokačné experimenty zahŕňajúce vystavenie simulovaným EMP v kontrolovaných laboratórnych podmienkach boli tiež vykonané na rôznych druhoch. Bolo hlásené, že časovo stlačená simulovaná GM búrka ovplyvňuje uhly letu včiel pri výstupe z hniezda (Esquivel et al. 2014). Samce potkanov Wistar vystavené MF na základe skutočnej aktivity GM búrky vykazovali štatisticky významné zmeny v arteriálnom krvnom tlaku, keď sa počas experimentálneho obdobia vyskytla skutočná GM búrka (Martinez-Breton a Mendoza 2016; Martinez-Breton et al. 2016).

Simulované GM búrky narušili nočnú migračnú aktivitu u spevavcov (Bianco et al. 2019) a zmeny v intenzite GMF zmenili znaky spojené s migráciou u hnedého planthoppera *Nilaparvata lugens* (Wan a spol. 2020). Bolo hlásené, že normálne fluktuácie v oblasti GM ovplyvňujú počiatočnú orientáciu holubov (Kowalski et al. 1988).

Uvádza sa, že Powerline ELF-EMF vyvíjajú silný fyziologický stres na včely medonosné (Molina-Montenegro et al. 2023). Kalifornské maky rastúce do 10–25 m od zdrojov ELF-EMF s expozíciou MF 7–9  $\mu$ T prijali menej návštev včiel a vyprodukovali menej semien ako rastliny rastúce ďaleko od zdrojov. Ukázalo sa, že vysokonapäťové elektrické vedenia ELF-MF narušajú zarovnanie tiel prežúvavcov s GMF (Burda et al. 2009). Hovädzí dobytok vystavený rôznym MF priamo pod alebo v blízkosti elektrických vedení smerujúcich do rôznych magnetických smerov vykazoval odlišné vzory zarovnania. Rušivý účinok ELF-MF na zarovnanie tela sa znižoval so zvyšujúcou sa vzdialenosťou od vodičov.

Ukázalo sa, že RF polia nízke ako 1 nT antropogénneho elektromagnetického šumu v rozsahu MHz narušujú orientáciu magnetického kompasu u sťahovavých európskych vtákov, *Erithacus rubecula* (Engels a kol. 2014). Magnetická orientácia antarktického amfipodu *Gondogeneia antarctica* bol dezorientovaný v RF poli tak nízkom ako 2 nT, čo poukazuje na mimoriadnu citlivosť zvieracej magnetorecepce na slabé RF polia u morských bezstavovcov (Tomanová a Vacha 2016).

### 3.3. Ľudské reakcie na magnetické polia o sile Zeme v kontrolovaných laboratórnych podmienkach

Tu uvádzame dve nezávislé štúdie, ktoré boli starostlivo navrhnuté a dobre vykonané a preukázali ľudskú magnetorepepciu GM poľa za kontrolovaných laboratórnych podmienok (Wang et al. 2019; Chae a kol. 2022). Podrobnosti o údajných snímacích mechanizmoch sú podrobnejšie diskutované v Časti 4.

V prvej štúdii každý z 36 dobrovoľníkov sedel vo vnútri elektricky tienenej komory, v ktorej boli umiestnené tri ortogonálne sady štvorcových cievok, ktoré umožnili zmeniť okolité GM pole okolo hlavy účastníka (Wang et al. 2019). Všetky expozície sa uskutočnili v tme. Autori uviedli silné, špecifické reakcie ľudského mozgu na ekologicky relevantné rotácie MF so silou Zeme. Po geomagnetickej stimulácii došlo k poklesu amplitúdy alfa oscilácií elektroencefalografie (EEG) (8–13 Hz) opakovateľným spôsobom. Biofyzikálne testy odhalili, že nervová odpoveď bola citlivá na statické zložky a polaritu aplikovaných MF. To vylučuje čisto kvantovo-mechanický mechanizmus založený na RPM, RPM, ktorý dokáže detekovať iba axiálne zarovnanie. Tieto pozorovania sú v súlade s mechanizmom snímania zahŕňajúcim magnetické častice.

V druhej štúdii bol každý z 34 mužských dobrovoľníkov sedel na otočnej stoličke vystavený rôznym MF podobným GMF s rôznymi intenzitami, sklonmi a magnetickými severnými smermi (Chae et al. 2022). Pred každým experimentom subjekty krátkodobo hladovali alebo boli normálne kŕmené. V an *asociačná fáza*, subjekty smerujúce k okolitému magnetickému severu boli alebo neboli prispôsobené tak, aby spájali tento smer s jedlom. Počas *testovacia fáza*, v ktorej bol modulovaný magnetický sever náhodne nastavený na skutočný magnetický sever alebo skutočný magnetický juh, boli subjekty požiadané, aby uviedli modulovaný magnetický severný smer.

Vo viditeľnom svetle s plnou vlnovou dĺžkou (350 – 800 nm), subjekty, ktoré boli vyhľadované, aby spôsobili významné zníženie hladín glukózy v krvi, a s jedlom, ktoré bolo predtým upravené tak, aby bolo spojené s magnetickým severom, vykazovali významné zvýšenie schopnosti správne sa orientovať pomocou rotujúceho kresla v porovnaní so subjektmi, ktoré neboli kondicionované.

Ďalšie testy odhalili, že ľudská geomagnetická orientácia je vysoko citlivá na vlnovú dĺžku svetla a že modré svetlo hrá rozhodujúcu úlohu. Neboli pozorované žiadne významné rozdiely medzi mierami orientácie v tmavých podmienkach, čo naznačuje, že svetlo bolo rozhodujúce pre správnu magnetickú orientáciu.

Prítomnosť RF-EMF v rozsahu MHz bola testovaná na dobrovoľníkoch, ako je opísané inde v súvislosti s orientáciou vtákov (Ritz et al.2000,2004). Vystavenie 1,260 MHz, elektrónovej Larmorovej frekvencii v okolí GMF (45,0 $\mu$ T) a širokopásmové MF s nižšou frekvenciou, ale nie pole 1,890 MHz, výrazne narušili magnetickú orientáciu, čo naznačuje interferenciu EMF s otáčkami za minútu.

Tieto hlásené výsledky sú v rozpore s magnetorecepciou na báze magnetitu, ale podporujú názor, že svetlom aktivované radikálové páry pravdepodobne sprostredkovávajú magnetickú orientáciu u ľudí.

Štúdiá, ktorá je v súlade s magnetosnímaním zahŕňajúcim magnetické častice (Wang et al.2019) zdá sa, že je v rozpore so štúdiou, ktorá podporuje mechanizmus RPM závislý od svetla (Chae et al.2022). Tieto dve štúdie však použili veľmi odlišné experimentálne testy, ktoré by mohli skúmať rôzne receptory. Ľudia môžu mať dve metódy magnetorecepce, spoločné s vtákmi, o ktorých sa predpokladá, že majú v očiach radikálny párový kompas na snímanie smeru a magnetické častice inde na snímanie intenzity.

V súhrne výsledky niekoľkých provokačných experimentov a prirodzených pozorovaní na zvieratách napodobňujú zistenia o nepriaznivých zdravotných účinkoch GM búrok u ľudí. Vyznačujú sa zaslepenými expozíciami a objektívnymi meraniami, ktoré v prípade ľudí nepredpokladajú vedomé snímanie aplikovaných EMP.

### 3.4. Ľudské EHS spojené s vystavením RF-EMF

V posledných rokoch došlo k významnému nárastu počtu ľudí, ktorí hlásili nepriaznivé zdravotné účinky spôsobené EHS, spolu so zodpovedajúcim nárastom environmentálnych antropogénnych EMP, najčastejšie z moderných bezdrôtových zariadení.

Konvenčná lekárska veda zvyčajne diagnostikuje účinky EHS ako psychosomatické „nocebo“ účinky. Účinky EHS pokrývajú širokú škálu zdravotných problémov, vrátane bolesti hlavy, tinitusu, únavy, stresu, kožných symptómov, ako je pichanie, pocity pálenia a vyrážky, bolesti pohybového aparátu, poruchy spánku, problémy s náladou, závraty a mnoho ďalších zdravotných problémov (Landgrebe et al.2009; Medeiros a Sanchez2016; Leszczynski2022). Tieto účinky sú do značnej miery hlásené sami, ale ich pravdivosť je podporená objektívnymi meraniami snímania MF u ľudí a rôznych druhov uvedených vyššie.

Zatiaľ čo mnohé z týchto symptómov sú špecifické pre človekom vytvorené EMP, prekrývajú sa s niektorými akútnymi symptómami spojenými s GM búrkami. Avšak, zatiaľ čo MF kolísanie

v dôsledku geneticky modifikovaných búrok dochádza k pomerne zriedkavým expozíciám, v dnešnom prostredí je chronická expozícia širokému spektru fluktuácií EMP z umelých zdrojov (Obrázky 1a2).

### 3.5. Liečba elektromagnetickým poľom

Veľké množstvo základných vedeckých a klinických dôkazov dokazuje, že časovo premenné MF sily militesla, vysoko nad normálnou okolitou expozíciou, môžu modulovať molekulárne, bunkové a tkanivové funkcie fyziologicky a klinicky významným spôsobom. Zatiaľ čo bunkové mechanizmy zostávajú nejasné, MF sa používajú v celom rade stavov na liečbu depresie, zníženie bolesti, zlepšenie hojenia rán a kostí, zvýšenie krvného obehu a stimuláciu imunitného a endokrinného systému (Markov2015). Použitie pulzných elektromagnetických polí (PEMF) na liečbu veľkých depresívnych porúch je mimoriadne zaujímavé, pretože ilustruje priamy vplyv EMP na ľudský mozog (Blumberger et al.2018).

## 4. Mechanizmy pôsobenia

Akým mechanizmom (mechanizmami) zvieratá a niektorí ľudia prejavujú citlivosť spojenú s expozíciou MF a/alebo EMP, či už z prírodných alebo antropogénnych zdrojov, pri úrovniach expozície výrazne pod úrovňou GMF, v niektorých prípadoch pod 10 nT? (Engels a kol.2014; Tomanová a Vácha2016).

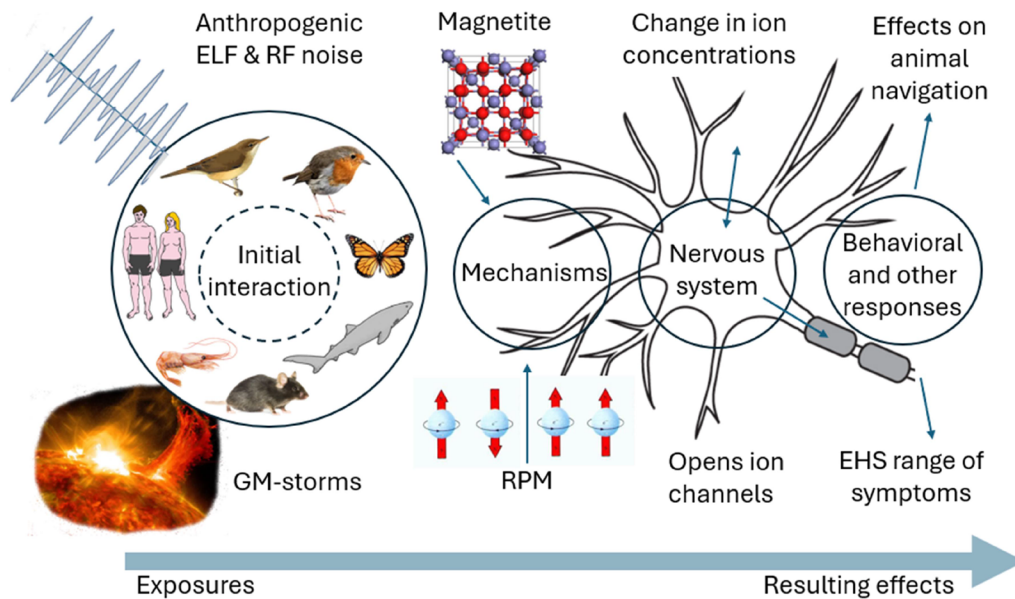
Jedným prístupom je identifikácia biologických markerov EHS podobným spôsobom, ako sa používa na chemickú citlivosť (Belpomme et al.2015; Belpomme a Irigaray2020, 2022, 2023). Nie je však jasné, či takéto markery sú skôr dôsledkom než kauzálnym faktorom EHS, alebo či prispievajú k predispozícii. Výzvou pri pochopení EHS je šmyková selektivita reakcie na vystavenie EMP. To zase naznačuje kognitívnu reakciu bez ohľadu na akúkoľvek vnútornú biologickú náchylnosť.

Aby sme túto otázku ďalej riešili, musíme pochopiť rozdiel medzi primárnym sensorom (založeným na fyzikálnych alebo chemických princípoch), prevodníkom, ktorý má biologickú povahu, a reakciou celého organizmu zahŕňajúcou kognitívne vstupy (Obrázok 3). Známym modelom pre kognitívnu odpoveď je tzv '*Analógia orchestra*'. Predstavte si, že hudobný fajnšmeker počúva skladbu orchestrálnej hudby. Zrazu inak slabý nástroj hrá nesprávnu notu. Fajnšmeker to okamžite počuje a môže byť tým dosť vyrušený, zatiaľ čo tí menej nároční môžu ignorovať zahrnutú nesprávnu notu.

Akým mechanizmom pozná hudobný znalec, že zaznela nesprávna nota? Nie je to ucho, ktorého funkciou je jednoducho detekovať zvuk; skôr je to mozog, ktorý interpretuje zvuky ako konštruovanú hudbu a poskytuje biologickú a výslednú kognitívnu odpoveď na pociťovanie nesprávnej noty.

Prítomnosť magnetických častíc v mozgu dostatočnej veľkosti na potenciálnu priamu transdukcii MF je mimoriadne zaujímavá (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, Diaz-Ricci,





**Obrázok 3.** Konceptualizácia vystavenia magnetickým a elektromagnetickým poľiam s nízkou intenzitou a ako to môže viesť k nepriaznivým behaviorálnym a iným reakciám. antropogénny elfský a vysokofrekvenčný šum interaguje s biologickými systémami dvoma základnými mechanizmami, ktoré sú predmetom záujmu: magnetickými časticami v tele a mechanizmom kvantovo-mechanických radikálových párov. Takéto interakcie môžu viesť k otvoreniu iónových kanálov bunkovej membrány, čo následne vedie k bunkovým a extracelulárnym zmenám v koncentráciách iónov. tieto sa následne spájajú s nervovým systémom a následne riadia behaviorálne a iné reakcie, vrátane eHS.

a kol. 1992). V prípade GM búrok sa tvrdilo, že kryptochrómový kompasový systém u zvierat sprostredkováva stresové reakcie širšie cez os hypotalamus-hypofýza-nadobličky (HPA), vrátane zmien cirkadiálneho správania v reakcii na zmeny v oblasti GM (Zavriet 2012). Túto predstavu podporujú zistenia u potkanov vystavených EMP mobilných telefónov (Zufry et al. 2023).

Niektoré typy EMF signálov majú za následok nepriaznivé reakcie u niektorých jedincov; tieto signály sú obzvlášť bioaktívne pre ľudí s EHS. Mozog na tieto signály reaguje nepriaznivo a to sa prenáša, aj keď nevedome, do zvyšku tela, čo má za následok nepriaznivé zdravotné symptómy. Situácia nie je nepodobná nežiaducim účinkom liekov na predpis, ktoré môžu postihnúť len malé percento ľudí.

Čo teda je *primárny* interakcia na fyzikálnej alebo chemickej úrovni medzi MF a biologickými systémami, najmä ľuďmi? Rozoberáme dva mechanizmy z oblasti magnetorecepcie zvierat, ich prepojenie s nervovým systémom a komunikáciu s mozgom, a tretí, ktorý sa objavuje novo.

#### 4.1. Magnetické častice v mozgu

Prítomnosť magnetických nanočastíc v živých organizmoch je dobre známa a bola dôkladne preskúmaná. Konkrétnym príkladom je evolúcia magnetotaktických baktérií spred dvoch miliárd rokov, ktoré obsahujú vo svojom tele reťazce magnetozómov nesúcich magnetit, čo im umožňuje plávať pozdĺž siločiar geomagnetického poľa (Bazylnski a Frankel 2004). Prítomnosť takýchto častíc v telách mnohých druhov, vrátane ľudí, môže pôsobiť ako metóda magnetorecepcie. Podporujú to teoretické úvahy a skutočnosť, že magnetit bol detegovaný v sensorických neurónoch (Winklhofer 2009; Shaw a kol. 2015).

Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) biomineralizácia bola charakterizovaná v ľudskom mozgu (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, Woodford, 1992). Energia jednotlivých častíc v MF, U, často prevyšovala tepelnú energiu kT. Jednotlivé veľkosti zrn boli teda bimodálne: väčšina bola v rozmedzí 10–70 nm, zatiaľ čo podiel bol v rozmedzí 90–200 nm s niektorými príkladmi veľkosti 600 nm. Celkovo merania naznačovali prítomnosť 5 miliónov kryštálov s jednou doménou na gram pre väčšinu tkanív v mozgu a viac ako 100 miliónov kryštálov na gram pre pia a dura. Údaje o magnetických vlastnostiach ukázali, že kryštály boli v zhlukoch medzi 50 a 100 časticami s  $U/kT$  hodnoty medzi 20 a 150.

V pitevných vzorkách pokrývajúcich vekový rozsah 3–89 rokov bola v ľudskom mozgu identifikovaná hojná prítomnosť magnetitových nanočastíc, oddelene od tých, ktoré sa pripisujú endogénnym zdrojom (Maher et al. 2016). Tieto zistenia naznačujú, že vonkajšie zdroje, ako sú častice pochádzajúce zo spaľovania, môžu vstúpiť do mozgu priamo cez čuchovú cibuľku. Stredná saturačná remanentná magnetizácia z cerebellum bola hlásená ako približne dvakrát vyššia ako magnetizácia z mozgovej kôry (Gilder et al. 2018). Magnetizácia mozgových kmeňov bola v priemere viac ako dvakrát väčšia ako magnetizácia mozgovej kôry. Autori dospeli k záveru, že magnetit je prednostne rozdelený v ľudskom mozgu, konkrétne v mozočku a mozgovom kmeni.

Úloha magnetitových častíc v ľudských tkanivách, najmä v mozgu, nie je známa. Tým, ktoré boli doteraz pozorované, chýba usporiadaná architektúra videná u zvierat. Veľkosti prítomných častíc naznačujú schopnosť časti orientovať sa v GM a antropogénnych poliach, vyvíjajúcich mechanický tlak priamo na mozgové bunky (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, Diaz-Ricci, et al. 1992). Bola tiež navrhnutá možnosť, že takéto pôsobenie môže byť dostatočné na otvorenie mechanicky citlivých transmembránových iónových kanálov.



Magnetit a súvisiace častice majú tiež schopnosť prenášať RF-EMF energiu z približne 500 MHz na najmenej 10 GHz (Kirschvink 1996). Možné dôsledky väzby MF na častice magnetitu boli testované prostredníctvom bakteriálneho analógu (*Magnetospirillum magnetotacticum*), ktorý produkuje intracelulárny biogénny magnetit podobný tomu, ktorý je prítomný v ľudskom mozgu (Cranfield et al. 2003). V porovnaní s falošným vystavením viedlo vystavenie 900 MHz emisiami mobilných telefónov k konzistentnému a výrazne väčšiemu podielu bunkovej smrti v exponovaných kultúrach.

V demonštračnom videu boli čuchové epitelové bunky pstruha obsahujúce magnetický materiál vizuálne identifikované ich rotačným správaním v MF (Eder et al. 2012). Magnetické inklúzie s dipólovými momentmi v rozsahu 4–10 fAm<sub>2</sub>. Zistilo sa, že sú pevne spojené s bunkovou membránou, čo umožňuje demonštrovať priamu transdukciu mechanického napätia produkovaného magnetickým krútiacim momentom pôsobiacim na bunkový dipól in situ.

Silné dôkazy podporujúce zapojenie magnetitových častíc a ich feromagnetizmu do ľudskej magnetorecepce sú prezentované v Časti 3.3 (Wang a kol. 2019). K dnešnému dňu však neexistuje žiadny explicitný dôkaz, že takéto častice sa spájajú s neurónmi spôsobom, ktorý vedie k behaviorálnej reakcii. Dôkazy môžu tiež podporiť pôsobenie navrhovaného magnetoreceptora založeného na MagR (časť 4.4). Celkovo magnetické častice predstavujú životaschopný biofyzikálny mechanizmus pre senzorickú transdukciu a poskytujú základ pre skúmanie správania ľudskej magnetorecepce.

#### 4.2. Mechanizmus radikálneho páru (RPM)

RPM je jediný zavedený mechanizmus, ktorým môžu MF s nízkou intenzitou meniť rýchlosti chemických reakcií a reakčné produkty. Robia to tak, že pracujú na stavoch rotácie radikálne páry, najmä riadenie konverzie z krátkych navrhnutých bez ich zodpovedajúceho *PLAC17* gény, celý život (~nanosekundy) singlet, S-stav do dlhšieho života (~mikrosekundy) triplet, T-stav. Radikály s dlhšou životnosťou majú viac času zúčastniť sa chemických reakcií, ktoré sú zvyčajne v S-stave nedostupné; vrátane možnosti spôsobiť biologické poškodenie (Schulten et al. 1978; Brocklehurst a McLauchlan 1996; Rodgers 2009; Hore a Mourissou 2016). Takéto zmeny v reakčných produktoch, ak sú spojené s nervovým systémom in vivo, by mohli predstavovať signál vedúci k množstvu biologických výsledkov (Zadeh-Haghighi a Simon 2022). Silný dôkaz o zapojení RPM do ľudskej magnetorecepce bol predložený v Časti 3.3 (Chae a kol. 2022).

Je pozoruhodné, že otáčky za minútu pracujú na energetických úrovniach asi desaťmiliónkrát pod úrovňou tepelnej energie. Zatiaľ čo porozumenie vzniklo v 70. rokoch 20. storočia v spinovej chémii, ďalšie korene možno nájsť v objave v roku 1896. *Zeemanov efektu* následné udelenie Nobelovej ceny z roku 1902 Pieterovi Zeemanovi. Takéto *kvantová mechanika* účinky nie sú intuitívne, ale sú potvrdené experimentálnymi pozorovaniami.

Pokiaľ ide o MF interakcie, je známe, že otáčky za minútu majú frekvenčný limit približne 10–100 MHz. V dôsledku toho RPM nemôže vysvetliť účinky frekvencie telekomunikačných nosných vln, napríklad na produkciu reaktívnych

formy kyslíka (ROS), ako to podporuje teoretická analýza Talbiho a kol. (2024). Pri takýchto frekvenciách je potrebné zvážiť ďalšie mechanizmy interakcie, ako je transdukcia magnetitovými nanočasticami a efekty elektrického poľa, bez frekvenčného obmedzenia na rádiových frekvenciách. O tejto problematike sa podrobnejšie hovorí v Časti 4.6 nižšie.

#### 4.2.1. RPM v magnetickom kompas vtákov a iných druhov

Úloha molekúl kryptochrómového proteínu pri akomodácii magnetorecepce prostredníctvom RPM bola rozsiahle skúmaná (Karki et al. 2021). Predpokladá sa, že kompas používaný vtákmi a inými druhmi funguje v molekulách kryptochrómových fotoreceptorových proteínov v oku, kde sa radikálové páry vytvárajú absorpciou modrého svetla a prenosom elektrónov (Ritz et al. 2000).

Dôkaz, že migračná orientácia európskych červienkov vystavených poliam s frekvenciou 1–10 MHz, až 85 nT, narušila ich migračnú orientáciu ovplyvnením procesu interkonverzie ST, ponúkol silnú podporu pre magnetický kompas založený na RPM (Ritz et al. 2004). Tieto nálezy boli replikované a nájdené u mnohých druhov. Odhady prahu detekcie MF boli postupne revidované smerom nadol a uvádza sa, že začínajú na úrovni nižšej ako 2,4 nT v záhradných peiciach (Pakhomov et al. 2017). Teraz existujú presvedčivé dôkazy, že hlavný magnetický kompas stáhovavých vtákov funguje prostredníctvom RPM, čo si vyžaduje prítomnosť kryptochrómov (Leberrecht et al. 2023).

#### 4.2.2. Ľudské kryptochrómy sú magnetosenzitivné

Ukázalo sa, že ľudské kryptochrómy (konkrétne hCRY2) sú magnetosenzitivné (Foley et al. 2011). Kedy *Drosophila melanogaster* ovocné mušky strácajú svoju magnetosenzitivitu. Citlivosť sa však obnoví zavedením ľudského CRY2 génu. Ľudský CRY2 je prítomný vo väčšine tkanív, vrátane mozgu (časť 4.5). Dôkazy naznačujú, že proteín CRY2 súvisia s ľudskou navigáciou (Xu et al. 2021).

#### 4.3. RPM v kryptochrómoch a spojenie s nervovými bunkami

Kryptochrómy sú všadeprítomne exprimované v orgánoch a tkanivách všetkých organizmov (Lin a Todo 2005; Sancar 2016). V kontexte príjmu MF prebieha diskusia o tom, či je prítomnosť kryptochrómov dostatočná na príjem MF alebo či fungujú ako signálne molekuly v smere aktuálneho MF receptora (Giachello et al. 2016; Bradlaugh a kol. 2023; Merlin 2023; Zhang a Malkemper 2023). Existujú ďalšie otázky, konkrétne môže príjem MF prebiehať v úplnej neprítomnosti svetla a ako sa informácie o MF spájajú s nervovými bunkami? Laboratórne experimenty zaoberajúce sa týmito problémami sa zamerali priamo na MF-indukovanú reakciu kryptochrómu v nervových bunkách, kde sa otázky prelínajú. Tu, my

riešiť tieto otázky oddelene zhrnutím niekoľkých kľúčových experimentálnych zistení.

### 4.3.1. Je kryptochróm magnetický senzor alebo prevodník skutočného senzora?

Vo vtáčom kompase sa predpokladá, že relevantné radikálové páry sa vytvárajú v kryptochrómoch excitáciou flavín adenín dinukleotidového kofaktora (FAD) modrým svetlom, po ktorej nasleduje prenos elektrónov cez reťazec troch tryptofánov (Trp). V prípade rastliny *Arabidopsis thaliana* kryptochróm, bol navrhnutý schematický obraz celej reakčnej dráhy radikálového páru (Solov'yov et al.2007). In *Drosophila* dôkazy naznačujú prítomnosť štvrtého Trp (Nohr et al.2016).

Tento obrázok nevyvetľuje mnohé fyziologické a behaviorálne pozorovania a bol spochybnený v štúdiách v *Drosophila* (Gegear a kol.2010; Fedele a spol.2014). Štúdie podrobne uvedené v Časť 4.3.4 uvádzajú prvý priamy experimentálny dôkaz, že MF modulácia aktivity kryptochrómu je schopná ovplyvniť aktivitu neurónov, aby umožnila zvieraci magnetorecepciu (Giachello et al.2016). Toto pozorovanie nevyžaduje reťazec Trp, ale C-koniec CRY je nevyhnutný pre citlivosť MF závislú od CRY. Táto práca bola rozšírená o podrobné štúdie presného fungovania RPM (Obrázok 4; Bradlaugh a kol. 2023). Autori uviedli, že 52 C-koncových aminokyselinových zvyškov v *Drosophila* kryptochróm, ktorému chýba kanonická doména viažuca FAD a reťazec Trp, sú dostatočné na uľahčenie magnetorecepcie. Vysoké hladiny samotného FAD sú dostatočné na to, aby spôsobili citlivosť neurónov na modré svetlo a zosilnenie tejto reakcie v ďalšej prítomnosti MF. Tieto pozorovania naznačujú, že alternatívne radikálové páry, ktoré nie sú priamo fotochemicky generované, môžu tiež prispieť k magnetorepcii.

Celkovo výsledky naznačujú, že „snímanie“ a „transdukcia“ MF sú samostatné vlastnosti, ktoré nemusí vykonávať tá istá molekula. Navyše, zatiaľ čo modré svetlo

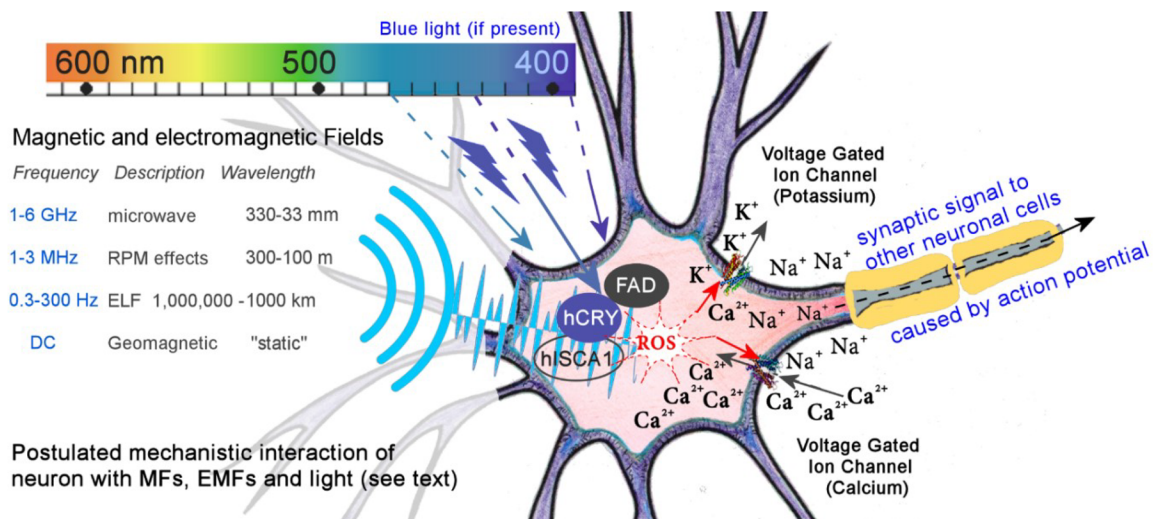
Zdá sa, že je to nevyhnutné na spustenie procesu RPM, existuje rastúci zoznam príkladov, ktoré uvádzajú, že kľúčové kroky relevantné pre magnetorecepciu prebiehajú v tme (Vieira et al.2012; Wiltschko a spol.2016; Höytö a kol. 2017; Pooam a kol.2019; Hammad a kol.2020). Príklad podzemných krtovitých krýs je tu obzvlášť dôležitý (Burda et al.1990; Burda2021).

Pohľad do fungovania magnetosenzitivity v tme možno získať zväžením kryptochrómového fotocyklu (Hammad et al.2020, Obrázok 4). Vo všeobecnosti, pokiaľ dôjde k počiatočnému kroku, ktorý generuje flavínový radikál (FADH•), magneticky citlivý krok môže byť oddelený od osvetlenia (Aguida et al.2024). Zdá sa, že kryptochrómy cicavčieho typu fungujú nezávisle od svetla a očakáva sa, že si zachovávajú schopnosť reagovať na MF (Sherrard et al.2018).

Existuje teda dostatok dôkazov, že kryptochrómy zohrávajú rozhodujúcu úlohu v magnetosenzitivite, aj keď sa ešte len uvidí, či fungujú ako receptory alebo signálne molekuly. Všeobecnejšie, MF efekty z pohľadu RPM ukazujú, že magnetosenzitivita je rozšírená v biológii (Zhang a Malkemper2023; Zadeh-Haghighi a Simon2022).

### 4.3.2. EMP uvoľňujú reaktívne formy kyslíka

Kľúčovou súčasťou procesu magnetorecepcie je uvoľňovanie voľných radikálov ROS. Táto téma bola diskutovaná v kontexte buniek vystavených ELF-MF in vitro (Mattsson a Simkó2014) a v kontexte neuropsychiatrických účinkov EHS (Pall2013,2016; Stein a Udasin2020). To zahŕňa návrh, že oscilujúce elektrické polia (EF) môžu viesť k otvoreniu alebo uzavretiu napäťovo riadených iónových kanálov (VGIC) (Panagopoulos et al.2000,2002, 2021). Účinky EMF na neurónové iónové kanály boli rozsiahle študované, čo odhalilo, že VGIC predstavujú hlavné prevodníky účinkov súvisiacich s EMF na centrálny nervový systém (Bertagna et al.2021). Nedávna kazuistika v



**Obrázok 4.** Postulované signálne dráhy kryptochrómu v drozofíle. V prítomnosti modrého (alebo bieleho) svetla a eMF sa kryptochróm aktivuje a produkuje voľné radikály (roS). to spôsobí otvorenie draslíkového kanála a spustenie akčných potenciálov, čo vedie k zvýšeniu intracelulárneho obsahu vápnika, čo následne aktivuje synaptickú signalizáciu VgIC (Bradlaugh et al.2023).

pacient s EHS odhalil korelácie s imunitnou odpoveďou na oxidačný stres (Thoradit et al.2024).

Niektoré štúdie sa zaoberajú úlohou RPM v procese uvoľňovania ROS. Patria sem zmeny v orientácii jadrového spinu, ktoré vedú k zmenám rýchlosti chemických reakcií a koncentrácií dôležitých signálnych molekúl (Henbest et al. 2004; Usselman a kol.2014,2016; Smith a kol.2021; Zadeh-Haghighi a Simon 2021).

Komplexná diskusia opisuje biologické účinky EMF na hmyz, z hľadiska primárneho EMF receptora, po ktorom nasleduje ephaptická väzba a vnímanie EMF cez iónové kanály na synchronizáciu neuronálnej aktivity (Thill et al. 2024). Zohľadňujú sa účinky ELF aj RF EMF, ktoré zahŕňajú zdroje, ako sú mobilné telefóny a telefóny DECT, základňové stanice, generátory signálu a cievkové systémy. Škodlivé účinky sú hlásené vo všetkých prípadoch.

#### 4.3.3. Pulzné EMP indukujú ľudské kryptochrómy, aby modulovali intracelulárne reaktívne formy kyseliny

PEMF indukujú produkciu ROS v ľudských bunkách a tento proces vyžaduje prítomnosť kryptochrómu (Sherrard et al. 2018). Najprv sa ukázalo, že transgénne *Drosophila* larvy vytvorené bez ich vlastných kryptochromových génov (*plakata* a *plakata2*) stratili citlivosť na MF, konkrétne na PEMF. však *Drosophilalarvy* prerobené s ľudským proteínom kryptochrómu-1 (HsCry1) reagovali na PEMF vo forme 10Hz, 1,8 militesla-pulzných MF.

Použitím buniek ľudskej embryonálnej obličky 293 (HEK293) in vitro sa zistilo, že ROS syntetizované v kryptochróme sú uvoľňované PEMF. Táto stimulácia PEMF vedie k akumulácii intracelulárnych ROS a tento účinok vyžaduje prítomnosť kryptochrómov. Dlhodobá expozícia PEMF indikovala toxicitu nahromadených ROS v bunkách HEK293. V ďalšom teste relevantnom pre terapeutické dôsledky pozorované u ľudí sa zistilo, že stimulácia PEMF reguluje expresiu génov reagujúcich na ROS.

#### 4.3.4. Špecifické zapojenie kryptochrómov do väzby MF na nervový systém

Jedna štúdia poskytla kritický dôkaz, že MF zosilňujú schopnosť svetlom aktivovaného CRY zvýšiť spaľovanie akčného potenciálu neurónov v *Drosophila*, čo naznačuje, že CRY je citlivý na externý MF, ktorý môže modifikovať správanie zvierat (Giachello et al.2016). Autori použili elektrofyziologické záznamy z motoneurónov identifikovaných lariev, v ktorých je CRY ektopicky exprimovaný, aby ukázali, že depolarizácia membránového potenciálu závislá od modrého svetla a zvýšený vstupný odpor sú výrazne potencionované expozíciou MF, ktorá vyvoláva zvýšené vypálenie akčného potenciálu. .

Táto práca bola rozšírená (Bradlaugh et al.2023). Keď sa MF naplnil samotným FAD, zvýšilo spaľovanie akčného potenciálu neurónových buniek, dokonca aj v neprítomnosti CRY. Tieto výsledky odhaľujú základné zložky primárneho magnetoreceptora u múch, čo poskytuje silný dôkaz

že páry radikálov, ktoré nie sú závislé od CRY, môžu vyvolať MF reakcie v bunkách (časť 4.3.1).

#### 4.3.5. Spracovanie signálu v mozgu z vtáčieho MF kompasu

Bola identifikovaná oblasť mozgu sťahovavých spevavých vtákov, kde sa spracovávajú informácie z MF Zeme (Mouritsen et al.2005). Autori určili túto oblasť *Skupina N*, ktorá sa nachádza v tesnej blízkosti *Wulst* vizuálna oblasť. Fungovanie *Skupina Na* existenciu kognitívnych máp v navigácii zvierat odvtedy skúmalo niekoľko autorov (Heyers et al.2022; Shirdhanka a Malkemper2024).

#### 4.3.6. Liečba EMF nevyžaduje svetlo, ale môže vyžadovať kryptochróm

Pri liečbe MF a EMP je obzvlášť účinným príkladom použitie PEMF. Pre pacientov s depresiou rezistentnou na liečbu je novou možnosťou neinvazívna stimulácia mozgu pomocou techník, ako je opakovaná transkraniálna magnetická stimulácia (rTMS) ľavého dorzolaterálneho prefrontálneho kortexu (Blumberger et al.2018).

Účinnosť tejto liečby bola vyvinutá empiricky s malým alebo žiadnym pochopením základných procesov v práci. Je zrejmé, že liečba sa dodáva priamo do špecifických oblastí mozgu, čo silne naznačuje, že nie je zahrnuté vystavenie svetlu. V skutočnosti je to evidentné pre iné EMP liečby, ako je hojenie kostí.

Na riešenie týchto mechanistických aspektov sa skúmalo použitie nízko-intenzívnej opakujúcej sa transkraniálnej magnetickej stimulácie (LI-rTMS) na spustenie vnútorných mechanizmov opravy mozgových nervových obvodov (Dufor et al.2019). Autori porovnávali cerebelárnu reinerváciu v explantátoch z myši divokého typu (WT) a dvojité knockout kryptochrómu (*Cry1-/-Cry2-/-*) myši. Tieto zistenia naznačujú, že LI-rTMS indukuje rast axónov a synaptogénu na opravu nervových obvodov. Tento typ opravy závisí od vzoru stimulácie a prítomnosti kryptochrómov.

Toto je prvý priamy dôkaz v centrálnom nervovom systéme myši, že cicavčie kryptochrómy sú nevyhnutné pre rast axónov indukovaný LI-rTMS a neosynaptogénu a zahŕňajú MF dodávané fokálne iba do časti mozgu. Namiesto aktivácie neurónov indukovaných elektrickými prúdmi môžu slabé MF pôsobiť prostredníctvom kryptochrómov na aktiváciu bunkových signálnych kaskád. Táto štúdia poskytuje ďalší príklad pôsobenia EMF v neprítomnosti svetla. Pri liečbe EMF je potrebné objasniť mechanickú úlohu kryptochrómu vzhľadom na RPM alebo akýkoľvek iný spôsob interakcie.

#### 4.4. Kryptochrómy, cirkadiálne rytmy a melatonín

Kryptochrómy sú najlepšie známe svojou kontrolou cirkadiálnych rytmov (Van der Horst et al.1999; Sancar2004, 2016). Dôležitým aspektom takejto kontroly je nočná produkcia silného prírodného antioxidantu a protirakovinového činidla melatonínu v epifýze. Sekrécia nočného epifýzového melatonínu je znížená pri úrovniach expozície šedej bielej



svetlo pri približne 10 luxoch a je úplne potlačené, keď nočné vystavenie svetlu (LAN) presiahne 200 luxov (približne 300 mW m<sup>-2</sup>) (Brainard a kol.2001; Zeitzer a kol. 2005). Modré svetlo zo svetelných diód je obzvlášť účinné pri potláčaní melatonínu u ľudí (West a kol.2011). Práca v nočnej smene, s ňou súvisiacou expozíciou LAN, je klasifikovaná ako 2 A pravdepodobný karcinogén (IARC2010).

Na rozdiel od LAN sa zdá, že MF sú menej účinné pri potláčaní melatonínu, pričom maximálna supresia sa pohybuje od 20 do 30 %. Ľudia vystavení vyvýšeným poliám, ktorí žijú napríklad pod vedením vysokého napätia, však môžu byť vystavení chronicky, takže celkový efekt môže byť väčší.

Experimentálna demonštrácia MF-indukovanej supresie melatonínu musí prekonať veľké rozdiely medzi fyzickými osobami v nočnej produkcii melatonínu (Sack et al. 1986). To naznačuje, že štúdiám s niekoľkými desiatkami subjektov bude chýbať rozlišovacia schopnosť na zistenie účinku (Touitou a Selmaoui2012). V dobre vykonanej štúdii zahŕňajúcej 203 žien a dizajn dávka-odozva bola zaznamenaná supresia melatonínu pri nočnej expozícii EMP 60 Hz už na 0,2 μT, s celkovým znížením o 14 % (Davis et al.2001). Celkovo sú štúdie MF narušenia melatonínu a cirkadiánnych rytmov v rozpore so žiadnym účinkom, čo naznačuje, že sa účinky vyskytujú (Henshaw2014; CwCUK2014).

Ukázalo sa, že slabé RF EMF ovplyvňujú cirkadiánne hodiny hmyzu (Bartos et al.2019).

#### 4.5. ISCA1, MagR zhluky železa a síry (Fe-S) a kryptochrómy

ISCA1, tiež známy ako MagR, je proteín zapojený do biogenézy a zostavovania klastrov železo-síra (Fe-S), ktoré sa nachádzajú v mitochondriách a na iných miestach (Qin et al.2016). Tieto zhluky sú základnými kofaktormi, ktoré sa nachádzajú vo všetkých kráľovstvách života a hrajú zásadnú úlohu v základných procesoch vrátane dýchania, fotosyntézy a fixácie dusíka (Shi et al.2021).

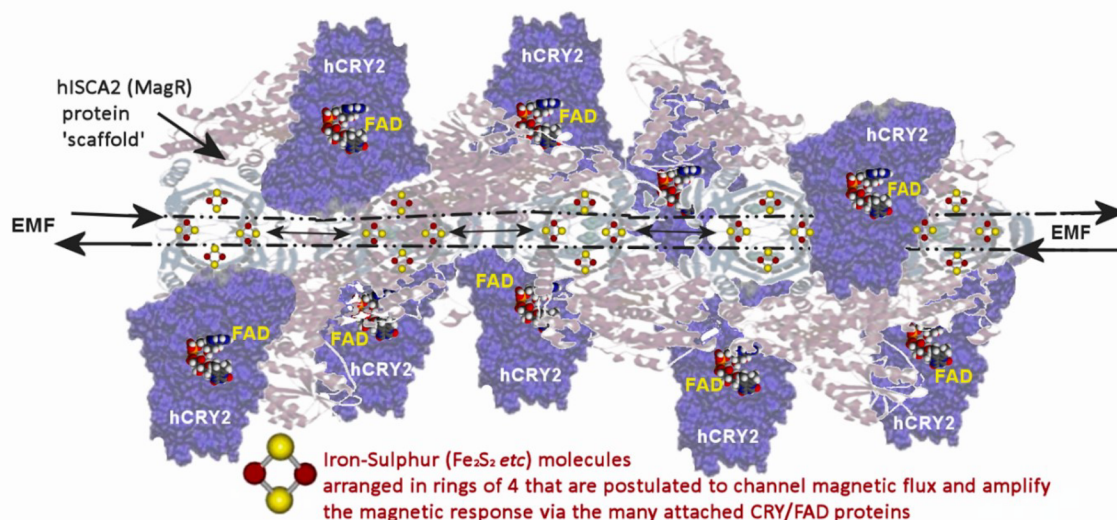
Bolo hlásené, že MagR tvorí tyčinkovitý komplex s kryptochrómom a ko-lokalizuje sa s CRY v sietnici holuba ( Obrázok 5) (Qin a kol.2016). Komplex vykazuje spontánne zarovnanie v MF. Ako taký predstavuje domnelý magnetoreceptor, ktorý má vlastnosti magnetického kompasu na základe chemického pôsobenia RPM a magnetických častíc. Autori ďalej testovali tvorbu komplexu medzi CRY a MagR u šiestich vybraných druhov: ovocná muška, motýľ monarcha, holub, krtonožka, veľryba minke a človek (Qin et al.2016). U ľudí boli identifikované dve izoformy CRY, hCry2-1 a hCry2-2. Z nich sa zistilo, že hCry2-2 tvorí komplex s hMagR.

Autori tiež špekulovali, že dynamika proteínového komplexu CRY / MagR a polymérna štruktúra tvorená samotným MagR môže pôsobiť ako biokompas v tme u niektorých typov buniek a živočíšnych druhov. Ďalšie štúdie charakterizovali povahu väzby Fe-S klastra v MagR (Guo et al.2021; Zhou a kol.2023). Pomocou rozptylu röntgenového žiarenia s malým uhlom sa skúmal mechanizmus magnetickej orientácie údajnej holubej štruktúry CRY/MagR (Arai et al.2022). Bolo poskytnuté objasnenie, že *Columba livia* holubí kryptochróm cCRY4 zvyšuje magnetickej orientačnú vlastnosť komplexu cCRY4 / cIMagR, keď MagR pôsobí ako lešenie pre fotochemickú reakciu cCRY4.

Naším primárnym záujmom je transdukcia MF do nervového systému v kontexte EHS. U ľudí, *hCRY2a* / *hISCA1/hMagR* gény sú exprimované spoločne vo väčšine orgánov a tkanív tela (Obrázok 6) (ID génu: 14082024; ID génu: 816892024). To poskytuje príležitosť na vytvorenie komplexov hCRY / hMagR ako všeobecný jav.

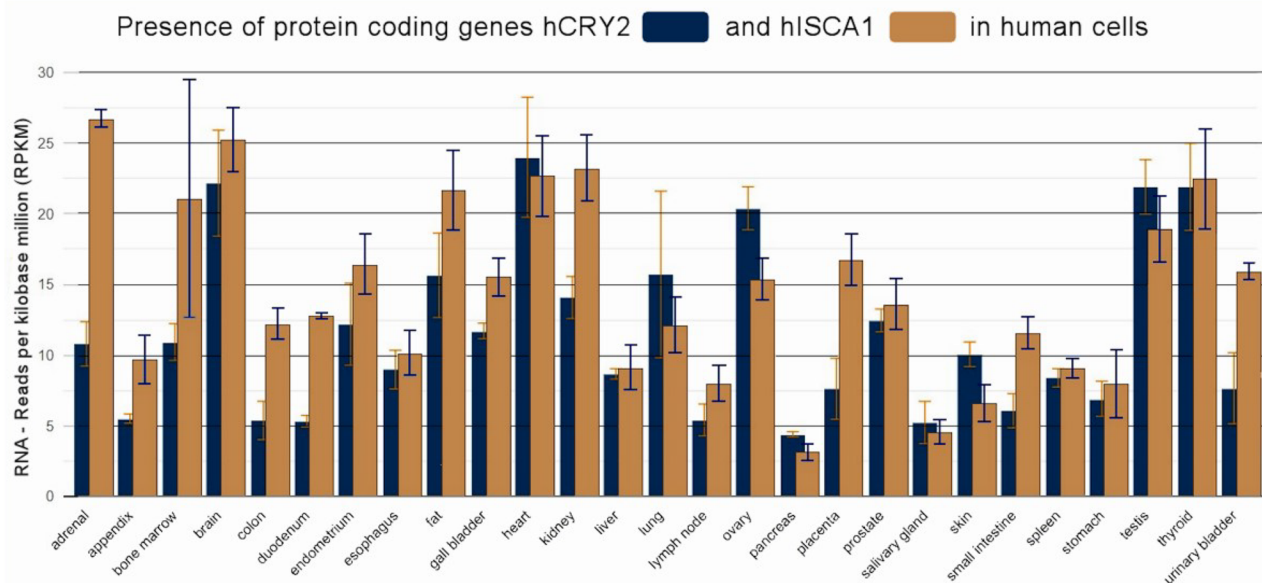
#### 4.6. Efekty elektrického poľa (EF).

Keďže telo je dobrý vodič, vonkajšie EF sú v ľudskom tele silne utlmené. Rušivé interné EF sú väčšinou vyvolané časovo sa meniacimi externými MF.



**Obrázok 5.** možný štruktúrny model magnetosensoru cry/Magr s až 10 molekulami cry pripojenými k jadrú Magr (na základe Qin et al. (2026), obrázok 3 a iné zdroje).





**Obrázok 6.** Proteíny ľudského kryptochrómu a klastrového zhluku železa a síry sú exprimované v širokom rozsahu ľudských buniek, najmä v ich mitochondriách.

#### 4.6.1. ELF EF

V dlhej sérii experimentov boli ľudské subjekty umiestnené v izolovaných testovacích zariadeniach, tienených pred premenlivým atmosférickým elektrickým poľom, typicky  $\sim 150V m^{-1}$  (Wever 1979). Subjekty boli potom vystavené 10 Hz nepretržitým štvorcovým vlnám až na niekoľko týždňov a intenzite poľa od nuly do  $300 V m^{-1}$ .

Pri nulovej expozícii sa pozorovalo štatisticky významné predĺženie 24-hodinového cirkadiálneho rytmu a výskyt vnútornej desynchronizácie. Pre expozíciu pravouhlých vln už od  $2,5 V m^{-1}$ , subjekty boli okamžite strhnuté vonkajším signálom, čo viedlo ku skráteniu cirkadiálnych rytmov, čo naznačuje, že ELF EF pôsobili ako zeitgebers.

Tieto a ďalšie súvisiace štúdie na ľuďoch a zvieratách sú zhrnuté v Henshaw et al. (2008). Okrem zmeny cirkadiálnych rytmov a iných nálezov sa pozorovalo aj narušenie nočného melatonínu.

#### 4.6.2. Frekvencie mobilných telefónov

Talbi a kol. (2024) citovať príklady deviatich štúdií, ktoré uvádzajú zvýšené hladiny ROS pri vystavení RF EMP. Štyri z nich používajú čistú RF nosnú vlnu (Luukkonen et al. 2009; De Iulius a kol. 2009; Sefidbacht a kol. 2014; Pooam a kol. 2022).

Zvyšných päť štúdií používa skutočné mobilné telefóny, ktoré obsahujú nízkofrekvenčné modulácie v rôznych formách. Je známe, že mobilné telefóny generujú ELF a VLF MF z prúdu batérie v hodnote až desiatok mikrottesla (Tuor et al. 2005). Vystavenie ľudí RF EMP z mobilných telefónov a súvisiacich zariadení zahŕňa signály modulácie nižšej frekvencie, ktoré pravdepodobne spadajú do oblasti RPM.

#### 4.6.3. Mechanistické úvahy

Pre externú expozíciu EF, Panagopoulos et al. (2000) navrhol model, v ktorom oscilujúce vonkajšie elektrické pole

vyvíja oscilačnú silu na voľné ióny, ktoré existujú na oboch stranách všetkých plazmatických membrán a môžu prechádzať cez transmembránové proteíny. Táto vonkajšia oscilačná sila spôsobuje vynútenú vibráciu voľných iónov, čo vedie k otváraniu alebo zatváraniu VGIC, ako je opísané v časti 4.3.2 vyššie.

Model predpovedá, že EF frekvencie pod 1 kHz (ELF polia) môžu byť bioaktívne, dokonca aj pri veľmi nízkych intenzitách niekoľkých voltov na meter. Pri RF frekvenciách musí mať pole 100 MHz intenzitu aspoň  $10^5 V m^{-1}$ , čo je rádovo väčšie ako limit ICNIRP  $62 V m^{-1}$ .

Pre RF EMP teoretická analýza Talbiho et al. (2024) podporuje známy frekvenčný limit 10–100 MHz, v ktorom môže pracovať RPM. Zistenia uvoľňovania ROS z expozícií čistých RF nosných vln by teda mohli podľa hypotézy vzniknúť z transdukcie magnetitovými nanočasticami alebo EF generovanými interne zložkou MF EMP alebo nejakou inou v súčasnosti neznámou cestou.

#### 4.7. Nelineárne a viacfázové odozvy

Väčšina ľudských reakcií na environmentálne faktory je nelineárna a zahŕňa mechanizmy spätnej väzby, ktoré riadia citlivosť a následné biologické a kognitívne dôsledky (Beckon et al. 2008). Týka sa to hmatu, zraku, sluchu, čuchu a chuti, ktoré majú funkcie zosilnenia a adaptácie, ktoré dosahujú extrémne široký dynamický rozsah, a vzťahuje sa aj na iné signály vrátane bolesti.

Jedným príkladom je naša reakcia na poškodenie DNA ionizujúcim žiarením. Po dlhých debatách je najvhodnejším modelom radiačnej ochrany lineárna žiadna prahová hodnota (LNT). Menšie genetické poškodenie nie je vždy opravené, pretože nedokonalé opravné procesy môžu spôsobiť väčšie poškodenie (Huang a Zhou 2021). Keď sa detekcia poškodenia zvyšuje, komunikácia imunitného systému spúšťa opravu alebo apoptózu (Nastasi et al. 2020). To vysvetľuje predchádzajúce tvrdenia, že „malé vystavenie žiareniu je ochranné“; teraz však vieme, že „malé“ poškodenie môže mať za následok budúcu genómovú nestabilitu.

Séria štúdií ukázala škodlivé účinky slabej expozície ELF MF na aktivitu ornitín dekarboxylázy a morfológiu kuracích embryí, ako aj zmiernujúce účinky superpozície nekoherentného ELF šumového poľa (Farrell et al.1997; Farrell a kol.1998). Súvisiace štúdie ukázali podobné účinky na mikrovlnné frekvencie a amplitúdy modulované pomocou ELF (Litovitz et al.1997).

## 5. Diskusia

Vo vedeckej oblasti magnetorecepcie sme zistili, že všetky formy života reagujú na MF, ako bolo rozsiahle skúmané u mnohých druhov. Literatúra je bujná.

Len v roku 2020 PubMed uvádza 600 článkov s kľúčovými slovami „*biológia magnetického poľa*“ (Sarimov a kol.2023b). Patria sem príklady mimoriadnej citlivosti, v niektorých prípadoch niekoľkokrát pod úrovňou prirodzeného geomagnetického poľa pozadia.

Preto by nemalo byť prekvapením, že ľudia sú schopní odhaliť MF, aj keď nevedome, ako to dokazuje zavedená literatúra týkajúca sa GM búrok a starostlivo kontrolovaných laboratórnych experimentov (Wang et al.2019; Chae a kol.2022).

Mechanistické chápanie magnetorecepcie v biológii bolo v posledných desaťročiach poháňané prevažne v reakcii na navigáciu zvierat a migráciu využívajúcu v rôznej miere pole GM. Zameriavame sa na mechanizmy magneto-snímania a spojenia s nervovým systémom, bez ohľadu na konkrétny účel správania.

Úloha magnetitu a príbuzných častíc ako primárnych MF/EMF detektorov, vrátane demonštrácie energetického spojenia s bunkami, bola široko diskutovaná (Eder et al. 2012). Zvlášť zaujímavá je schopnosť magnetitových nanočastíc absorbovať a prenášať EMR pri mikrovlnných frekvenciách až do 10 GHz prostredníctvom procesu feromagnetkej rezonancie (Kirschvink1996).

Ukázalo sa, že kryptochrómy, vrátane tých u ľudí, zohrávajú ústrednú úlohu pri magnetorepcii. Spárujú sa s nervovým systémom a tiež sa ukázalo, že zohrávajú kľúčovú úlohu pri reinervácii mozočku. Kryptochrómové pôsobenie zahŕňajúce RPM je podporované u mnohých živočíšnych a rastlinných druhov. Štúdie molekulárnej biológie a genetiky skúmajú presné fungovanie RPM, vrátane toho, či mechanizmus môže fungovať pri úplnej absencii svetla.

Pozorovanie, že MagR tvorí tyčinkovitý komplex s kryptochrómy, práve prebieha, čo by mohlo otvoriť novú možnosť zvýšenej magnetosenzitivity. Táto hypotéza naznačuje, že komplexy CRY/MagR majú schopnosť transdukovať MF/EMF vo väčšine tkanív a orgánov. To by mohlo vysvetliť rozsah a rôznorodosť nežiaducich účinkov hlásených jednotlivými pacientmi trpiacimi EHS.

Väčšina ľudí EHS uvádza citlivosť na úrovne EMP o mnoho rádov pod všetkými oficiálnymi úrovňami expozície a mnohí neuvádzajú zvýšenie účinkov pri vyšších expozíciách. Pokus o zlepšenie ochranného usmernenia bol stanovený v usmernení EUROPAEM (Belyaev et al.2016). Tieto úrovne sú uvedené v **Obrázky 1a2**. Bohužiaľ, takmer všetky publikované provokačné štúdie EHS predpokladali lineárnu odozvu na dávku a zohľadňujú len expozície blízke

hlavné medzinárodné úrovne poradenstva (IEEE2019; ICNIRP2010,2020). Tiež sa im nepodarilo zabezpečiť, aby „falošné“ expozície mali extrémne nízke úrovne ELF a RF polí pozadia.

Preto môžeme ponúknuť niekoľko odpovedí na otázky (i) – (iv) v úvode.

- i. Mnohé druhy zvierat a hmyzu reagujú nepriaznivo na nepatrné zmeny MF/EMF, najmä pri interferencii s magnetonavigáciou. Existuje množstvo dôkazov, najmä z GM búrok, že ľudia môžu cítiť EMP nízkej intenzity, aj keď nevedome. Nežiaduce reakcie, typické pre tie, ktoré sa uvádzajú ako ľudské EHS, odrážajú, že mozog považuje niektoré signály EMF za rušivé, najmä tie, ktoré majú pulzatívny charakter, a či sú prítomné ELF a/alebo RF.
- ii. Hlavnými kandidátmi na primárnu detekciu MF/EMF sú magnetické častice a RPM cez kryptochrómy. Obidve ponúkajú cesty na spojenie s nervovým systémom a mozgom, ako to podporujú laboratórne štúdie s ľudskými dobrovoľníkmi. Oba procesy môžu fungovať pri snímaní ľudského MF/EMF.
- iii. Akútna aktivácia VGIC EMP vo vzťahu k MF aj EF bola diskutovaná inde (Pall2013,2016; Panagopoulos a kol.2021). Ukážka toho, že EMP pôsobia na ľudské kryptochrómy *Drosophila* uvoľniť ROS, čo vedie k aktivácii VGIC v neurónoch, poskytuje ďalší mechanistický pohľad na tento proces (Sherrard et al. 2018). ROS predstavujú potenciálne toxické metabolity s viacerými úlohami pri stresovej reakcii a starnutí buniek, vrátane potenciálnej úlohy pri podpore rakoviny, ktorá sa zhoršuje chronickou expozíciou EMP.

Zaoberali sme sa tu hlavne MF. Ukázalo sa tiež, že ľudia sú citliví na EF (McCarty et al.2011), ale ako je uvedené v časti 4.6, naše chápanie mechanizmov účinku EF je obmedzenejšie.

## 6. Závěry a odporúčania

1. Na vedeckej úrovni výskumníci pôsobiaci v oblasti o *magnetorecepcia v biológii* mali byť informovaní o EHS ako o probléme ľudského verejného zdravia a mali by byť financovaní na riešenie tohto problému v rámci svojho vedeckého výskumu.
2. Všetky zainteresované strany, najmä osoby trpiace EHS a lekári, by si mali byť vedomí značného nárastu pochopenia mechanizmov, ktorými všetky formy života vnímajú MF/EMP, a to aj na extrémne nízkych úrovniach v posledných desaťročiach. Doterajšiemu výskumu EHS výrazne bráni zásadný nedostatok vedomostí medzi mnohými lekáorskými vedcami a výskumníkmi v oblasti EHS, pokiaľ ide o súčasné vedecké chápanie mechanizmov a procesov kvantovej biológie. To viedlo k návrhu a analýze nevhodných provokačných testov.

3. Takmer všetky existujúce epidemiologické a provokačné štúdie nedokázali adekvátne určiť a zmerať potrebné závislé a nezávislé premenné. Konkrétne:
  - i. aby ste náležite technicky podrobne charakterizovali EMP/RF expozície (vrátane úrovni elektrických a MF; priemerných a špičkových úrovni hustoty výkonu, príslušných frekvencií a modulačných charakteristík).
  - ii. efektívne triediť účastníkov, aby sa odstránili „elektrofóbní“ a iní dobrovoľníci, ktorí sami nahlásili zjavné problémy súvisiace s EHS.
  - iii. v provokačných štúdiách nerozpoznať nelineárnu povahu reakcií EHS a extrémne nízke úrovne expozície (< 100 nT), ktoré majú účinky, a namiesto toho použiť relatívne vysoké expozície, ktoré sa dostávajú bližšie k úrovniam podľa ICNIRP a IEEE.
  - iv. v provokačných štúdiách poskytnúť účastníkovi pohodlné testovacie miesto s extrémne nízkym EMF/RF, skrývané z antropogénnych zdrojov a poskytnúť primeraný čas (dni namiesto hodín) na vyplavenie nepriaznivých účinkov medzi expozíciami.
5. Štúdie EHS by sa mali odkloniť od súčasných, neforenzných epidemiologických prístupov a ľudských subjektívnych provokačných štúdií (Leszczynski2022; Rööslí a kol.2024). Namiesto toho by sa mali skúmať objektívne merania biologických parametrov, ako je variabilita srdcovej frekvencie, aktivita mozgových vln (napr. fMRI a širokopásmové EEG) a imunitná odpoveď na oxidačný stres (Caswell a kol.2016; Gurfinkel a kol. 2018; Pishchalnikova a kol. 2019; Wang a kol.2019; Thoradit a kol.2024). Upozorňujeme, že tieto prístupy vyžadujú sofistikovaný dizajn a analýzu a pokročilý dizajn osobných expozimetrov.
6. Odporúčame, aby WHO náležite prehodnotila svoje chápanie EHS, aby ich zosúladiť so značným množstvom dostupnej vedeckej literatúry, ktorá ukazuje mechanické dôkazy o interakciách všetkých foriem života, vrátane ľudí, s nízkou úrovňou elektrických a magnetických polí.

## Podakovanie

Ďakujeme Petrovi Bowellovi za pomoc pri hľadaní literatúry. Ďakujeme tiež Michaelovi Bevingtonovi, Michaelovi Kundimu, Brianovi Steinovi a Ericovi Warrantovi za užitočné diskusie.

## Etické schválenie

Nevyžaduje sa (používajú sa iba anonymizované zverejnené údaje).

## Súhlas so zverejnením

Pôvodné dielo dvoch autorov – nevyžaduje sa externý súhlas.

## Príspevky autorov

Autori spoločne diskutovali o tom, ktoré témy zahrnúť do článku. Rôzne časti najprv napísal jeden autor a potom ich skontroloval druhý autor. Každý autor prispel k tomuto procesu rovnakým dielom.

## Vyhľadanie o zverejnení

Spoločnosť DLH nedeklaruje žiadne známe konkurenčné finančné záujmy alebo osobné vzťahy, ktoré by mohli mať vplyv na prácu uvedenú v tomto článku. AP ako neplatený dobrovoľník pomáha prevádzkovať Powerwatch (malá mimovládna organizácia v Spojenom kráľovstve, ktorá poskytuje bezplatné verejné informácie o možných účinkoch vystavenia EMP) približne 30 rokov. AP vyhlasuje, že ho pri spoluautorstve tohto článku neovplyvnili žiadne finančné ani súvisiace záujmy ani osobné vzťahy.

## Financovanie

Na prípravu tohto rukopisu neboli poskytnuté žiadne finančné prostriedky.

## Poznámky o prispievateľoch

**Denis L Henshaw**, PhD a člen Collegium Ramazzini, je emeritným profesorom účinkov ľudského žiarenia na Univerzite v Bristole a bývalým vedeckým riaditeľom na CHILDREN with CANCER UK, registrovaná charitatívna organizácia: 298405. Jeho hlavnými kariérnymi záujmami je kvantifikácia environmentálnych expozícií ovplyvňujúcich riziko detskej leukémie. vrátane ionizujúceho žiarenia, elektromagnetických polí, nočného svetla a znečistenia ovzdušia časticami.

**Alasdair Philips**, BSc, DAQE. Profesionálny inžinier na dôchodku (poľnohospodárske a elektrotechnické a elektronické inžinierstvo) a nezávislý výskumník v oblasti životného prostredia. Bývalý správca detí s CANCER UK. Skúsenosti zahŕňajú podrobnú prácu o elektromagnetických poliach, klimatických zmenách a interakcii všetkých aspektov životného prostredia so životom na Zemi.

## ORCID

Denis L. Henshaw  <http://orcid.org/0000-0001-9734-6558>  
Alasdair Philips  <http://orcid.org/0000-0002-2713-2279>

## Dostupnosť údajov a materiálov

Všetky zdroje údajov sú citované a dostupné v odkazoch.

## Referencie

- Aguida B, Babo J, Baouz S, Jourdan N, Procopio M, El-Esawi MA, Engle D, Mills S, Wenkel S, Huck A, a kol.2024. „Vidieť“ elektromagnetické spektrum: reflektor na kryptochrómový fotocyklos. *Front Plant Sci.* 15:1340304. doi:10.3389/fpls.2024.1340304. Ahlbom A, Deñ N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH a kol.2000. Súhrnná analýza magnetických polí a detskej leukémie. *Br J Cancer.* 83 (5): 692 – 698. doi:10.1054/bjoc.2000.1376.
- Arai S, Shimizu R, Adachi M, Hirai M.2022. Účinky magnetického poľa na štruktúra a molekulárne správanie holubieho železo-sírového proteínu. *Protein Sci.* 31(6):e4313. doi:10.1002/pro.4313.
- Azcárate T, Mendoza B.2017. Vplyv geomagnetickej aktivity a atmosférický tlak u dospelých s hypertenziou. *Int J Biometeorol.* 61 (9): 1585-1592. doi:10.1007/s00484-017-1337-x.
- Azcárate T, Mendoza B, Lev JR.2016. Vplyv geomagnetickej aktivity a atmosférický tlak na ľudský arteriálny tlak počas slnečného cyklu 24. *Adv Space Res.* 58(10):2116-2125. doi:10.1016/j.asr.2016.05.048.
- Bartoš P, Netušil R, Slabý P, Doležel D, Ritz T, Vácha M.2019. slabý rádiových frekvencií polia ovplyvňujú cirkadiánne hodiny hmyzu. *Rozhranie JR Soc.* 16(158):20190285. doi:10.1098/rsif.2019.0285.
- Bazyliński DA, Frankel RB.2004. Tvorba magnetozómov v prokary-poznámky. *Nat Rev Microbiol.* 2(3):217-230. doi:10.1038/nrmicro842.
- Beckon W, Parkins C, Maximovich A, Beckon A.2008. Všeobecná aplikácia - modelovanie dvojfázových vzťahov. *Environ Sci Technol.* 42(4):1308-1314. doi:10.1021/es071148m.



- Belpomme D, Campagnac C, Irigaray P. 2015. Spofahlivý biomark choroby - charakterizujú a identifikujú elektrohypersenzitivitu a viacnásobnú chemickú citlivosť ako dva etiopatogénne aspekty jedinečnej patologickej poruchy. *Rev Environ Health*. 30(4):251-271. doi:10.1515/reveh-2015-0027.
- Belpomme D, Irigaray P. 2020. Elektrohypersenzitivita ako nová identifikácia zistená a charakterizovaná neurologická patologická porucha: ako ju diagnostikovať, liečiť a predchádzať. *Int J Mol Sci*. 21(6):1915. doi:10.3390/ijms21061915.
- Belpomme D, Irigaray P. 2022. Prečo elektrohypersenzitivita a príbuzné príznaky sú spôsobené neionizujúcimi elektromagnetickými poľami vytvorenými človekom: prehľad a lekárske posúdenie. *Environ Res*. 212 (Pt A): 113374. doi:10.1016/j.envres.2022.113374.
- Belpomme D, Irigaray P. 2023. Kombinovaný neurologický syndróm pri elektrohypersenzitivite a viacnásobnej chemickej citlivosti: klinická štúdia 2018 prípadov. *J Clin Med*. 12(23):7421. doi:10.3390/jcm12237421. Bertagna F, Lewis F, Silva SRP, McFadden J, Jeevaratnam K. 2021. Účinky elektromagnetické polia na neurónových iónových kanáloch: systematický prehľad. *Ann NY Acad Sci*. 1499 (1): 82-103. doi:10.1111/nyas.14597.
- Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshhammer H, Lercher P, Müller K a kol. 2016. EUROPAEM usmernenie EMP 2016 pre prevenciu, diagnostiku a liečbu zdravotných problémov a chorôb súvisiacich s EMP. *Rev Environ Health*. 31(3):363-397. doi:10.1515/reveh-2016-0011.
- Bianco G, Ilieva M, Åkesson S. 2019. Magnetické búrky narúšajú nočný čas migračnú aktivitu u spevavcov. *Biol Lett*. 15(3):20180918. doi:10.1098/rsbl.2018.0918.
- Blumberger DM, Vila-Rodriguez F, Thorpe KE, Feffer K, Noda Y, Giacobbe P, Knyahnytska Y, Kennedy SH, Lam RW, Daskalakis ZJ a kol. 2018. Účinnosť výbuchu theta oproti vysokofrekvenčnej opakovanej transkraniálnej magnetickej stimulácii u pacientov s depresiou (TRID): randomizovaná štúdia non-inferiority. *Lancet*. 391(10131): 1683-1692. doi:10.1016/S0140-6736(18)30295-2. Bosch-Capblanch X, Esu E, Oringanje CM, Dongus S, Jalilian H, Eyes J, Auer C, Meremikwu M, Röösli M. 2024. Účinky vystavenia rádiokvencným elektromagnetickým poľiam na symptómy hlásené ľuďmi: systematický prehľad experimentálnych štúdií na ľuďoch. *Environ Int*. 187:108612. doi:10.1016/j.envint.2024.108612.
- Bradlaugh AA, Fedele G, Munro AL, Hansen CN, Hares JM, Patel S, Kyriacou CP, Jones AR, Rosato E, Baines AB. 2023. Základné prvky magnetosenzitivity radikálových párov u *Drosophila*. *Príroda*. 615(7950):111-116. doi:10.1038/s41586-023-05735-z.
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MUDr. 2001. Akčné spektrum pre reguláciu melatonínu u ľudí: dôkaz nového cirkadiálneho fotoreceptora. *J Neurosci*. 21(16):6405-6412. doi:10.1523/JNEUROSCI.21-16-06405.2001. Brocklehurst R, McLaughlan KA. 1996. Mechanizmus voľných radikálov pre účinky environmentálnych elektromagnetických poľí na biologické systémy. *Int J Radiat Biol*. 69(1):3-24. doi:10.1080/095530096146147.
- Bruno WJ. 2024. Čo nám fotónová energia hovorí o mobilnom telefóne bezpečnosť? <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1104/1104.5008.pdf>. Burch JB, Reif JS, Yost MG. 1999. Sú spojené geomagnetické poruchy so zníženým nočným vylučovaním metabolitu melatonínu u ľudí. *Neurosci Lett*. 266 (3): 209-212. doi:10.1016/S0304-3940(99)00308-0.
- Burch JB, Reif JS, Yost MG. 2008. Geomagnetická aktivita a človek vylučovanie metabolitu melatonínu. *Neurosci Lett*. 438 (1): 76-79. doi:10.1016/j.neulet.2008.04.031.
- Burda H, Marhold S, Westenberger T, Wiltshcko R, Wiltshcko W. 1990. Dôkaz o orientácii magnetického kompasu v podzemnom hlodavci *Cryptomys hottentotus* (Bathergidae). *Skúsenosti*. 46 (5): 528 - 530. doi:10.1007/BF01954256.
- Burda H, Begall S, Červený J, Neef J, Nemeč P. 2009. Extrémne nízka frekvencia elektromagnetické polia narúšajú magnetické usporiadanie prežívavcov. *Proc Natl Acad Sci USA*. 106(14):5708-5713. doi:10.1073/pnas.0811194106.
- Burda H. 2021. Zmyslové vnímanie krtkov a krtkov: posúdiť komplexného prirodzeného globálneho evolučného „experimentu“. Kapitola 7 v *Nové obzory vo vývoji*. Amsterdam, Holandsko: s. 161 - 191. doi:10.1016/B978-0-323-90752-1.00006-7. Elsevier Science; Caswell JM, Singh M, Persinger MA. 2016. Simulovaný náhly nárast v geomagnetickej aktivite a jej vplyve na variabilitu srdcovej frekvencie: skúsenosti mentálne overenie korelačných štúdií. *Life Sci Space Res* (Amst). 10:47-52. doi:10.1016/j.lssr.2016.08.001.
- Chae KS, Kim SC, Kwon HJ, Kim Y. 2022. Ľudský magnetický zmysel je sprostredkované mechanizmom závislým od rezonancie svetla a magnetického poľa. *Sci Rep*. 12(1):8997. doi:10.1038/s41598-022-12460-6. Zavriť J. 2012. Sú stresové reakcie na geomagnetické búrky sprostredkované kryptochromový kompasový systém? *Proc Biol. Sci*. 279(1736):2081-2090. doi:10.1098/rspb.2012.0324.
- Cranfield C, Wieser HG, Madan JA, Dobson J. 2003. Predbežné hodnotenie - Využitie biologických mechanizmov feromagnetickéj transdukcie na báze nanomateriálov pre bioefekty mobilných telefónov. *IEEE Trans Nanobiosci*. 2(1):40-43. doi:10.1109/TNB.2003.810155. CwCUK. 2014. Správa Iana Jonesa o EMF Think Tank. Deti s Cancer UK. septembra. [prístup 14. augusta 2024]. <https://www.childrenwithcancer.org.uk/wp-content/uploads/2016/12/CwCUK-report-on-EMF-think-tank-September2014.pdf>.
- Davis S, Kaune WT, Mirick DK, Chen C, Stevens RG. 2001. Obytný magnetické polia, nočné svetlo a nočná koncentrácia 6-sulfatoxymelatonínu v moči u žien. *Am J Epidemiol*. 154 (7): 591-600. doi:10.1093/aje/154.7.591.
- De Iuliis GN, Newey RJ, King BV, Aitken RJ. 2009. mobilný telefón rádiová indukujú produkciu reaktívnych foriem kyslíka a poškodenie DNA v ľudských spermách in vitro. *PLoS One*. 4(7):e6446. doi:10.1371/journal.pone.0006446.
- Dimitrova S, Stoilova I, Yanev T, Cholakov I. 2004. Vplyv miestnych a globálnych geomagnetická aktivita na ľudskú kardiovaskulárnu homeostázu. *Arch Environ Occup Health*. 59(2):84-90. doi:10.3200/AEOH.59.2.84-90. Dreyer D, Frost B, Mouritsen H, Günther A, Green K, Whitehouse M, Johnsen S, Heinze S, Warrant E. 2018. Magnetické pole Zeme a vizuálne orientačné body riadia migračné letové správanie nočného austrálskeho nočného motýľa *Bogong*. *Curr Biol*. 28(13):2160-2166.e5. doi:10.1016/j.kub.2018.05.030.
- Dufor T, Grehl S, Tang AD, Doulazmi M, Traoré M, Debray N, Dubacq C, Deng ZD, Mariani J, Lohof AM, a kol. 2019. Oprava nervového okruhu pomocou magnetickej stimulácie s nízkou intenzitou vyžaduje bunkové magnetoreceptory a špecifické stimulačné vzorce. *Sci Adv*. 5(10):eaav9847. doi:10.1126/sciadv.aav9847.
- Eder SHK, Cadiou H, Muhamad A, McNaughton PA, Kirschvink JL, Winklhofer M. 2012. Magnetická charakterizácia izolovaných kandidátskych magnetoreceptorových buniek stavovcov. *Proc Natl Acad Sci USA*. 109(30): 12022-12027. doi:10.1073/pnas.1205653109.
- Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, Elbers D, Kittel A, Hore PJ, Mouritsen M. 2014. Antropogénny elektromagnetický šum narúša orientáciu magnetického kompasu u stáhovavého vtáka. *Príroda*. 509(7500):353-356. doi:10.1038/príroda13290.
- Esquivel DMS, Corrêa AAC, Vaillant OS, Bandeira de Melo V, Gouvêa GS, Ferreira CG, Ferreira TA, Wajnberg E. 2014. Časom stlačená simulovaná geomagnetická búrka ovplyvňuje uhly letu včely bez žihadla *Tetragonisca angustula*. *Naturwissenschaften*. 101 (3): 245-249. doi:10.1007/s00114-014-1147-5.
- Farrell JM, Litovitz TL, Penafiel M, Montrose CJ, Doinov P, Barber M, Brown KM, Litovitz TA. 1997. Vplyv pulzných a sínusových magnetických poľí na morfológiu vyvíjajúcich sa kuracích embryí. *Bioelektromagnetické*. 18(6):431-438. doi:10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:6<431::aid-bem5>3.0.co;2-3.
- Farrell JM, Barber M, Krause D, Litovitz TA. 1998. Superpozícia a dočasne nekoherentné magnetické pole inhibuje 60Hz-indukované zmeny v ODC aktivite vyvíjajúcich sa kuracích embryí. *Bioelektromagnetické*. 19(1):53-56. doi:10.1002/(sici)1521-186x(1998)19:1<53::aid-bem6>3.0.co;2-3. Fedele G, zelená EW, Rosato E, Kyriacou CP. 2014. Elektromagnetické pole narúša negatívnu geotaxiu u *Drosophila* prostredníctvom cesty závislej od CRY. *Nat Commun*. 5(1):4391. doi:10.1038/ncomms5391. Feigin VL, Parmar PG, Barker-Collo S, Bennett DA, Anderson CS, Thrift AG, Stegmayr B, Rothwell PM, Giroud M, Bejot Y a kol. 2014. Geomagnetické búrky môžu vyvolať mŕtvicu: dôkazy zo 6 veľkých populačných štúdií v Európe a Austrálii. *Mŕtvica*. 45 (6): 1639-1645. <http://stroke.ahajournals.org/content/early/2014/04/22/STROKEAHA.113.004577>. doi:10.1161/STROKEAHA.113.004577.
- Foley LE, Gegear RJ, Reppert SM. 2011. Exponáty ľudského kryptochrómu magnetosenzitivita závislá od svetla. *Nat Commun*. 2(1):356. <https://www.nature.com/articles/ncomms1364>. doi:10.1038/ncomms1364.



- Galland P, Pazur A. 2005. Magnetorecepcia v rastlinách. *J Plant Res.* 118(6):371-389. doi:10.1007/s10265-005-0246-r.
- Gegear RJ, Foley LE, Casselman A, Reppert SM. 2010. Zvieracie kryptochrómy sprostredkujú magnetorecepciu netradičným fotochemickým mechanizmom. *Príroda.* 463(7282):804-807. doi:10.1038/príroda08719. ID génu: 1408.2024. Génová databáza, National Library of Medicine, ID: 1408. [prístup 10. augusta 2024]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene/1408> ID génu: 81689.2024. Génová databáza, National Library of Medicine, ID: 81689. [prístup 10. augusta 2024]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene/?term=hISCA1>.
- Ghione S, Mezzasalma L, Del Seppia C, Papi F. 1998. Robte geomagnetické poruchy slnečného pôvodu ovplyvňujú arteriálny krvný tlak? *J Hum Hypertens.* 12(11):749-754. doi:10.1038/sj.jhh.1000708. Giachello CNG, Scrutton NS, Jones AR, Baines RA. 2016. Magnetické polia modulujú reguláciu aktivácie neurónov pomocou kryptochrómu závislú od modrého svetla. *J Neurosci.* 36(42):10742-10749. doi:10.1523/JNEUROSCI.2140-16.2016.
- Gilder SA, Wack M, Kaub L, Roud SC, Petersen N, Heinsen H, Hillenbrand P., Milz S., Schmitz C. 2018. Distribúcia nosičov magnetickej remanencie v ľudskom mozgu. *Sci Rep.* 8(1):11363. doi:10.1038/s41598-018-29766-z.
- Granger J, Cummer SA, Lohmann KJ, Johnsen S. 2022. Environmentálne zdroje vysokofrekvenčného šumu: potenciálne vplyvy na magnetorecepciu. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.* 208(1): 83-95. doi:10.1007/s00359-021-01516-z.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. 2000. A súhrnná analýza magnetických polí, drôtových kódov a detskej leukémie. *Epidemiológia.* 11(6):624-634. doi:10.1097/00001648-200011000-00003.
- Guo Z, Xu S, Chen X, Wang C, Yang P, Qin S, Zhao C, Fei F, Zhao X, Tan PH, a kol. 2021. Modulácia magnetických vlastností MagR prostredníctvom väzby klastra železa a síry. *Sci Rep.* 11(1):23941. doi:10.1038/s41598-021-03344-2. Gurfinkel YI, Vasin AL, Pishchalnikov YR, Sarimov RM, Sasonko ML, Matveeva TA. 2018. Geomagnetická búrka v laboratórnych podmienkach randomizovaný experiment. *Int J Biometeorol.* 62(4):501-512. doi:10.1007/s00484-017-1460-8.
- Hammad M, Albaqami M, Pooam M, Kernevez E, Witczak J, Ritz T, Martino C, Ahmad M. 2020. Magnetická citlivosť sprostredkovaná kryptochrómom v *Arabidopsis* sa vyskytuje nezávisle od prenosu elektrónov do flavínu vyvolaného svetlom. *Photochem Photobiol Sci.* 19(3):341-352. doi:10.1039/c9pp00469f.
- Henbest KB, Kukura P, Rodgers CT, Hore PJ, Timmel ČR. 2004. Rádio účinky frekvenčného magnetického poľa na radikálovú rekombinantnú reakciu: diagnostický test na mechanizmus radikálového páru. *J Am Chem Soc.* 126(26):8102-8103. doi:10.1021/ja048220q.
- Henshaw DL, Reiter RJ. 2005. Spôsobujú magnetické polia zvýšené riziko detskej leukémie prostredníctvom narušenia melatonínu? *Bioelektromagnetické.* 7:586-597. doi:10.1002/bem.20135.
- Henshaw DL, Ward JP, Matthews JC. 2008. Kontrola: môže rušiť atmosférické elektrické pole vytvorené iónmi koróny elektrického vedenia narúša produkciu melatonínu v epifýze? *J Pineal Res.* 45(4):341-350. doi:10.1111/j.1600-079X.2008.00594.x.
- Henshaw DL. 2014. ELF EMF a narušenie melatonínu. [prístup 14 august 2024]. <https://www.powerwatch.org.uk/pdfs/Henshaw-2014-ELF%20EMF%20and%20melatonin%20disruption.pdf>.
- Henshaw DL, Belpoggi F, Mandrioli D, Philips A. 2024. Kapitola 46. Elektromagnetické polia. In: Ruth AE, Philip JL, editori. Učebnica environmentálneho zdravia detí. Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/oso/9780197662526.003.0046.
- Heyers D, Musielak I, Haase K, Herold C, Bolte P, Güntürkün O, Mouritsen H. 2022. Morfológia, biochémia a konektivita klastra N a hipokampálna formácia u sťahovavého vtáka. Funkcia štruktúry mozgu. 227(8):2731-2749. doi:10.1007/s00429-022-02566-r. Hore PJ, Mouritsen H. 2016. Mechanizmus radikálových párov magnetorecepcia. *Annu Rev Biophys.* 45(1): 299-344. doi:10.1146/annurevbiophys-032116-094545.
- Höytö A, Herrala M, Luukkonen J, Juutilainen J, Naarala J. 2017. Bunková detekcia 50Hz magnetických polí a slabé modré svetlo: účinky na hladiny superoxidov a genotoxicitu. *Int J Radiat Biol.* 93(6): 646-652. doi:10.1080/09553002.2017.1294275.
- Huang R, Zhou PK. 2021. Oprava poškodenia DNA: historické perspektívy, mechanistické dráhy a klinická translácia pre cieľnú liečbu rakoviny. *Signal Transduct Target Ther.* 6(1):254. doi:10.1038/s41392-021-00648-7.
- Atlas ľudských bielkovín-CRY2. 2024. <https://www.proteinatlas.org/ENSG00000121671-CRY2/tkanivo>. Prístup 16. augusta 2024. IARC. 2010. Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny. Monografie hodnotenia karcinogénnych rizík pre ľudí. Vol. 98. Maľovanie, hasičstvo a práca na zmeny. Lyon, Francúzsko: Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny. 150 cours Albert Thomas, 69372 Lyon Cedex 08, Francúzsko. ISBN-13-978-92-832-1298-0.
- IEEE. 2019. Štandard pre úrovne bezpečnosti s ohľadom na expozíciu ľudí elektrické, magnetické a elektromagnetické polia, 0Hz až 300 GHz, štandard IEEE C95.1-2019; októbra. <https://standards.ieee.org/ieee/C95.1/4940/>.
- ICNIRP. 2010. Medzinárodná komisia pre neionizujúce žiarenie tekcia. Pokyny na obmedzenie vystavenia časovo premenlivým elektrickým a magnetickým poliam (1Hz-100 kHz). *Health Phys.* 99(6):818-836. doi:10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením [ICNIRP]. 2020. Pokyny na obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz). *Health Phys.* 118(5):483-524. doi:10.1097/HP.0000000000001210.
- ITU-R S.372-16. 2022. Medzinárodná telekomunikačná únia. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-16-202208-III-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-16-202208-III-PDF-E.pdf).
- Juutilainen J, Herrala M, Luukkonen J, Naarala J, Hore PJ. 2018. Magnetokarcinogéza: existuje mechanizmus pre karcinogénne účinky slabých magnetických polí? *Proc R Soc B.* 285(1879):20180590. doi:10.1098/rspb.2018.0590.
- Karki N, Vergish S, Zoltowski BD. 2021. RECENZIA kryptochrómov: photochemický a štruktúrny pohľad na magnetorecepciu. *Protein Sci.* 30(8):1521-1534. doi:10.1002/pro.4124.
- Kay RW. 1994. Geomagnetické búrky: súvislosť s výskytom dehtak meraný počtom hospitalizácií. *Br J Psychiatry.* 164(3): 403-409. doi:10.1192/bjp.164.3.403.
- Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A, Woodford BJ. 1992. Magnetit biomineralizácia v ľudskom mozgu. *Proc Natl Acad Sci USA.* 89(16):7683-7687. doi:10.1073/pnas.89.16.7683.
- Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A, Diaz-Ricci JC, Kirschvink SJ. 1992. Magnetit v ľudských tkanivách: mechanizmus biologických účinkov slabých magnetických polí ELF. *Bioelektromagnetické. Supl* 1:101-113. doi:10.1002/bem.2250130710.
- Kirschvink JL. 1996. Mikrovlnná absorpcia magnetitom: možná mechanizmus spájania netermálnych úrovni žiarenia s biologickými systémami. *Bioelektromagnetické.* 17(3):187-194. doi:10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:3<187::AID-BEM4>3.0.CO;2-%23.
- Kowalski U, Wiltschko R, Fuller E. 1988. Normálne výkyvy geomagnetické pole môže ovplyvniť počiatočnú orientáciu holubov. *J Comp Physiol.* 163(5): 593-600. doi:10.1007/BF00603843.
- Kraus J, Fleisch D. 1999. Elektromagnetika s aplikáciami. 5. vyd. New York (NY): McGraw-Hill; p. 332-336.
- Krylov VV. 2017. Prehľad: biologické účinky súvisiace s geomagnetickým pôsobením a možné mechanizmy. *Bioelektromagnetické.* 38(7):497-510. doi:10.1002/bem.22062.
- Landgrebe M, Frick U, Hauser S, Hajak G, Langguth B. 2009. Asociácia tinnitu a elektromagnetickej precitlivosti: náznaky spoločnej patofyziológie? *PLoS One.* 4(3):e5026. doi:10.1371/journal.pone.0005026.
- Landler L, Keays DA. 2018. Kryptochrómy: magnetosensory s zlovestná stránka? *PLoS Biol.* 16(10):e3000018. doi:10.1371/journal.pbio.3000018.
- Leberecht B, Wong SY, Satish B, Döge S, Hindman J, Venkatraman L, Apte S, Haase K, Musielak I, Dautaj G, et al. 2023. Horná hranica pre narušenie orientácie magnetického kompasu širokopásmovým rádiovým polom u nočných spevavých vtákov. *Proc Natl Acad Sci USA.* 120(28):e2301153120. doi:10.1073/pnas.2301153120.
- Leszczynski D. 2022. Prehľad vedeckých dôkazov o jedincoch citlivosti na elektromagnetické polia (EHS). *Rev Environ Health.* 37(3):423-450. doi:10.1515/reveh-2021-0038.
- Lin C, Todo T. 2005. Kryptochrómy. *Životopis genómu.* 6:220. doi:10.1186/sk-2005-6-5-220.
- Litovitz TA, Penafiel LM, Farrel JM, Krause D, Meister R, Mullins JM. 1997. Bioefekty vyvolané vystavením mikrovlňám sú zmiernené superpozíciou hluku ELF. *Bioelektromagnetické.* 18(6):422-430. doi:10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:6<422::AID-BEM4>3.0.CO;2-4.

- Luukkonen J, Hakulinen P, Mäki-Paakkanen J, Juutilainen J, Naarala J. 2009. Zvýšenie chemickej indukovanej produkcie reaktívnych foriem kyslíka a poškodenia DNA v ľudských neuroblastómových bunkách SH-SY5Y pomocou rádiových frekvencií žiarenia 872 MHz. *Mutat Res.* 662(1-2):54-58. doi:10.1016/j.mrfmmm.2008.12.005.
- Maier BA, Ahmed ISAM, Karloukovski V, McLaren DA, Foulds PG, Allsop D, Mann DMA, Torres-Jardón R, Calderon-Garciduenas L. 2016. Nanočastice znečistenia magnetitom v ľudskom mozgu. *Proc Natl Acad Sci USA.* 113(39):10797-10801. doi:10.1073/pnas.1605941113. Marais A, Adams B, Ringsmuth AK, Ferretti M, Gruber JM, Hendriks R, Schuld M, Smith SL, Sinayskiy I, Krüger TPJ a kol. 2018. Budúcnosť kvantovej biológie. *Rozhranie JR Soc.* 15(148):20180640. doi:10.1098/rsif.2018.0640.
- Markov M. 2015. Magnetoterapia XXI storočia. *Electromagn Biol Med.* 34(3): 190-196. PMID26444192 doi:10.3109/15368378.2015.1077338.
- Martínez-Bretón JL, Mendoza B. 2016. Účinky magnetických polí pro- vyvolané simulovanými a skutočnými geomagnetickými búrkami na potkanoch. *Adv Space Res.* 57(6):1402-1410. doi:10.1016/j.asr.2015.11.023. Martínez-Bretón JL, Mendoza B, Miranda-Anaya M, Durán P, Flores-Chávez PL. 2016. Umelá reprodukcia magnetických polí produkovaných prirodzenou geomagnetickou búrkou zvyšuje systolický krvný tlak u potkanov. *Int J Biometeorol.* 60(11):1753-1760. doi:10.1007/s00484-016-1164-5. Mattsson MO, Simkó M. 2014. Zoskupenie experimentálnych podmienok ako prístup k hodnoteniu účinkov extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí na oxidačnú odozvu v štúdiách in vitro. *Front Public Health.* 2:132-11. doi:10.3389/fpubh.2014.00132.
- McCarty DE, Carrubba S, Chesson AL, JrFritel IIC, Gonzalez-Toledo E, Marino AA. 2011. Elektromagnetická precitlivosť: dôkaz nového neurologického syndrómu. *Int J Neurosci.* 121(12): 670-676. doi:10.3109/00207454.2011.608139.
- Medeiros LN, Sanchez TG. 2016. Tinnitus a mobilné telefóny: úloha elektromagnetické rádiových frekvencií žiarenia. *Braz J Otorinolaryngol.* 82(1):97-104. doi:10.1016/j.bjorl.2015.04.013.
- Merlin C. 2023. Magnetorecepcia hmyzu: Výkrik pre mechanickú in- pamiatku. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.* 209(5): 785-792. doi:10.1007/s00359-023-01636-8. Molina- Montenegro MA, Acuña-Rodríguez IS, Ballesteros GI, Baldelomar M, Torres-Díaz C, Broitman BR, Vázquez DP. 2023. Elektromagnetické polia narúšajú službu opelovania včelami. *Sci Adv.* 9(19):eadh1455. doi:10.1126/sciadv.adh1455. Mouritsen H, Feenders G, Liedvogel M, Wada MK, Jarvis ED. 2005. Oblasť mozgu s nočným videním u sťahovavých spevavých vtákov. *Proc Natl Acad Sci USA.* 102(23):8339-8344. doi:10.1073/pnas.0409575102. Naisbett-Jones LC, Lohmann KJ. 2022. RECENZIA: magnetorecepcia a magnetická navigácia v rybách: polstoročie objavov. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.* 208(1): 19-40. doi:10.1007/s00359-021-01527-w.
- Správa NASA CR-166661. 1981. Interakcie EMF s ľudským telom. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19810017132/downloads/19810017132.pdf>.
- Správa NASA SP-8017. 1969. Magnetické polia - zemské a mimozemské. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19690030884/downloads/19690030884.pdf>.
- Nastasi C, Mannarino L, D'Incalci M. 2020. Reakcia na poškodenie DNA a imunitnú obranu. *Int J Mol Sci.* 21(20):7504. <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/20/7504>. doi:10.3390/ijms21207504. Nishimura T, Tsai IJ, Yamauchi H, Nakatani E, Fukushima M, Hsu CY. 2020. Asociácia geomagnetických porúch a pokusov o samovraždu na Taiwane, 1997-2013: prierezová štúdia. *Int J Environ Res Public Health.* 17(4):1154. doi:10.3390/ijerph17041154.
- Nohr D, Franz S, Rodriguez R, Paulus B, Essen LO, Weber S, Schleicher E. 2016. Predĺžený prenos elektrónov v živočíšnych kryptochrómoch sprostredkovaný tetradou aromatických aminokyselín. *Biophys J.* 111(2): 301-311. doi:10.1016/j.bpj.2016.06.009.
- Pakhomov A, Bojarinova J, Cherbunin R, Chetverikova R, Grigoryev PS, Kavokin K, Kobylkov D, Lubkovskaja R, Chernetsov N. 2017. Veľmi slabé oscilujúce magnetické pole narúša magnetický kompas migrantov spevavých vtákov. *Rozhranie JR Soc.* 14(133):20170364. doi:10.1098/rsif.2017.0364.
- Pall ML. 2013. Elektromagnetické polia pôsobia prostredníctvom aktivácie napätovo riadeného vápnikových kanálov, aby sa dosiahli priaznivé alebo nepriaznivé účinky. *J Cell Mol Med.* 17(8):958-965. doi:10.1111/jcmm.12088.
- Pall ML. 2016. Mikrovlnné frekvenčné elektromagnetické polia (EMF) vyvolávajú rozsiahle neuropsychiatrické účinky vrátane depresie. *J Chem Neuroanat.* 75(Pt B):43-51. doi:10.1016/j.jchemneu.2015.08.001. Palmer SJ, Rycroft MJ, Cermack M. 2006. Slnečná a geomagnetická aktivita, napr. extrémne nízkofrekvenčné magnetické a elektrické polia a ľudské zdravie na zemskom povrchu. *Surv Geophys.* 27(5):557-595. doi:10.1007/s10712-006-9010-7. DJ Panagopoulos, Messini N, Karabarbounis A, Philippetis AL, Margaritida LH. 2000. Mechanizmus pôsobenia oscilujúcich elektrických polí na bunky. *Biochem Biophys Res Commun.* 272(3): 634-640. doi:10.1006/bbrc.2000.2746.
- DJ Panagopoulos, Karabarbounis A, Margaritis LH. 2002. Mechanizmus na pôsobenie elektromagnetických polí na bunky. *Biochem Biophys Res Commun.* 298(1): 95-102. doi:10.1016/s0006-291x(02)02393-8. DJ Panagopoulos, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos GP. 2021. Elektromagnetické polia vytvorené človekom: iónová nútená oscilácia a dysfunkcia iónového kanála riadeného napätím, oxidačný stres a poškodenie DNA (Prehľad). *Int J Oncol.* 59(5):92. doi:10.3892/ijo.2021.5272.
- Pazúr A, Schimek C, Galland P. 2007. Magnetorecepcia v mikroorganizmoch a huby. *Cent Eur J Biol.* 2(4):597-659. doi:10.2478/s11535-007-0032-z. Phillips JB, Diego Rasilla FJ. 2022. RECENZIA: obojživelník magnetický zmysel(y). *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.* 208(5-6):723-742. - doi:10.1007/s00359-022-01584-9. Pishchalnikov RY, Gurfinkel YI, Sarimov RM, Vasin AL, Sasonko ML, Matveeva TA, Binhi VN, Baranov MV. 2019. Kardiiovaskulárna odpoveď ako marker environmentálneho stresu spôsobeného zmenami geomagnetického poľa a lokálnym počasím. *Biomed Signal Process.* 51:401-410. doi:10.1016/j.bspc.2019.03.005.
- Pooam M, Arthaut LD, Burdick D, Link J, Martino CF, Ahmad M. 2019. Magnetická citlivosť sprostredkovaná kryptochrómom receptora modrého svetla Arabidopsis sa vyskytuje počas reoxidácie flavínov v tme. *Planta.* 249(2): 319-332. doi:10.1007/s00425-018-3002-r.
- Pooam M, Jourdan N, Aguida B, Dahon C, Baouz S, Terry C, Raad H, Ahmad M. 2022. Vystavenie 1,8 GHz vysokofrekvenčnému polu moduluje ROS v ľudských bunkách HEK293 ako funkciu amplitúdy signálu. *Commun Integr Biol.* 15(1):54-66. doi:10.1080/19420889.2022.2027698. Pophof B, Henschmacker B, Kattinig DR, Kuhne J, Vian A, Ziegelberger G. 2023. Biologické účinky rádiových frekvencií elektromagnetických polí nad 100 MHz na faunu a flóru: správa z workshopu. *Health Phys.* 124(1): 31-38. doi:10.1097/HP.0000000000001625. Qin S, Yin H, Yang C, Dou Y, Liu Z, Zhang P, Yu H, Huang Y, Feng J, Hao J a kol. 2016. Magnetický proteínový biokompas. *Nat Mater.* 15(2):217-226. doi:10.1038/nmat4484.
- Ritz T, Adem S, Schulten K. 2000. Model na báze fotoreceptorov magnetorecepcia u vtákov. *Biophys J.* 78(2):707-718. doi:10.1016/S0006-3495(00)76629-X.
- Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. 2004. Rezonančné efekty naznačujú mechanizmus radikálového páru pre vtáčiu magnetický kompas. *Príroda.* 429(6988):177-180. doi:10.1038/nature02534.
- Rodgers CT. 2009. Účinky magnetického poľa v chemických systémoch. *Čistá Appl Chem.* 81(1): 19-43. doi:10.1351/PAC-CON-08-10-18. Rössli M, Dongus S, Jalilian H, Eysers J, Esu E, Oringanje CM, Meremikwu M, Bosch-Capblanch X. 2024. Účinky vystavenia rádiových frekvencií elektromagnetickým poliam na tinitus, migrénu a nešpecifické symptómy u bežnej a pracujúcej populácie: systematický prehľad a metaanalýza pozorovacích štúdií u ľudí. *Environ Int.* 183:108338. doi:10.1016/j.envint.2023.108338. Roussel A. 2024. ScienceClick: pôvod elektromagnetických vln a prečo sa správajú tak ako sa správajú. [prístup 14. augusta 2024]. [https://www.youtube.com/watch?v=V\\_jYXQFjCmA](https://www.youtube.com/watch?v=V_jYXQFjCmA).
- Sack RL, Lewy AJ, Erb DL, Vollmer WM, Singer CM. 1986. Ľudská produkcia melatonínu s vekom klesá. *J Pineal Res.* 3(4):379-388. doi:10.1111/j.1600-079x.1986.tb00760.x.
- Sancar A. 2016. Nobelova prednáška: Mechanizmy opravy DNA pomocou photolyáza a excízná nukleáza. *Angew Chem Int Ed Engl.* 55(30):8502-8527. doi:10.1002/anie.201601524.
- Sancar A. 2004. Regulácia cirkadiánnych hodín cicavcov pomocou kryptochrómu. *J Biol Chem.* 279(33):34079-34082. doi:10.1074/jbc.R400016200.
- Sarimov RM, Serov DA, Gudkov SV. 2023a. Biologické účinky mag- čisté búrky a magnetické polia ELF. *Biológia (Bazilej).* 12(12):1506. doi:10.3390/biology12121506.

- Sarimov RM, Serov DA, Gudkov SV. **2023b**. Hypomagnetické stavy a ich biologické pôsobenie (prehľad). *Biológia*. 12(12):1513. doi:10.3390/biologia12121513.
- Schliephake E. **1932**. Arbeitsgebiete auf dem Kurzwellegebiet. [Polia krátkovlnného regiónu]. *Deut Med Wochenschrif*. 32:1235–1240.
- Schmidchen K, Driessen S, Oftedal G. **2019**. Metodické obmedzenie - v experimentálnych štúdiách vývoja symptómov u jedincov s idiopatickou environmentálnou intoleranciou pripisovanou elektromagnetickým poliám (IEI-EMF) – systematický prehľad. *Zdravie životného prostredia*. 18(1):88. doi:10.1186/s12940-019-0519-x.
- Schulten K, Swenberg CE, Weller A. **1978**. Biomagnetický senzoričný mechanizmus nízkej založený na koherentnom spinovom pohybe elektrónov modulovanom magnetickým poľom. *Z Phys Chem*. 111(1):1–5. doi:10.1524/zpch.1978.111.1.001.
- Sefidbacht Y, Moosavi-Movahedi AA, Hosseinkhani S, Khodaghali F, Torkzadeh-Mahani M, Foolad F, Faraji-Dana R. **2014**. Účinky 940 MHz EMF na bioluminiscenciu a oxidačnú odpoveď stabilných buniek HEK produkujúcich luciferázu. *Photochem Photobiol Sci*. 13(7): 1082–1092. doi:10.1039/c3pp50451d.
- Seomun G, Lee J, Park J. **2021**. Vystavenie extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poli a detská rakovina: systematický prehľad a metaanalýza. *PLoS One*. 16(5):e0251628. doi:10.1371/journal.pone.0251628. Shaw J, Boyd A, House M, Woodward R, Mathes F, Cowin G, Saunders M, Baer B. **2015**. Magnetorecepcia sprostredkovaná magnetickými časticami. *Rozhranie JR Soc*. 12(110):0499. doi:10.1098/rsif.2015.0499.
- Sherrard RM, Morellini N, Jourdan N, El-Esawi M, Arthaut LD, Niessner C, Rouyer F, Klarsfeld A, Doulazmi M, Witzcak J, et al. **2018**. Elektromagnetické polia s nízkou intenzitou indukujú ľudský kryptochróm, aby moduloval intracelulárne reaktívne formy kyslíka. *PLoS Biol*. 16(10):e2006229. doi:10.1371/journal.pbio.2006229.
- Shi R, Hou W, Wang ZQ, Xu X. **2021**. Biogenéza skupiny železa a síry a ich úloha v metabolizme DNA. *Front Cell Dev Biol*. 9:735678. doi:10.3389/fcell.2021.735678.
- Shirdhanka RN, Malkemper EP. **2024**. Kognitívne mapy a magnet - ic zmysel u stavovcov. *Curr Opin Neurobiol*. 86:102880. doi:10.1016/j.conb.2024.102880.
- Smith J, Zadeh-Haghighi H, Salahub D, Simon C. **2021**. Radikálne páry môže hrať úlohu pri celkovej anestézii vyvolanej xenónom. *Sci Rep*. 11(1): 6287. doi:10.1038/s41598-021-85673-w.
- Solov'yov IA, Chandler DE, Schulten K. **2007**. Účinky magnetického poľa v *Arabidopsis thaliana* kryptochróm-1. *Biophys J*. 92(8):2711–2726. doi:10.1529/biophysj.106.097139.
- Stein Y, Udasin IG. **2020**. Elektromagnetická hypersenzitivita (EHS, mikro - vlnový syndróm) – Prehľad mechanizmov. *Environ Res*. 186:109445. doi: 10.1016/j.envres.2020.109445.
- Talbi O, Zadeh-Haghighi H, Simon C. **2024**. Radikálna dvojica mecha - nismus nedokáže vysvetliť účinky telekomunikačnej frekvencie na reaktívne formy kyslíka. predtlač bioRxiv. doi:10.1101/2024.06.23.600261.
- Thill A, Cammaerts MC, Balmori A. **2024**. Biologické účinky el. tromagnetické polia na hmyze: systematický prehľad a metaanalýza. *Rev Environ Health*. 39(4):853-869. doi:10.1515/reveh-2023-0072.
- Thoradit T, Thongyoo K, Kamoltheptawin K, Tunprasert L, El-Esawi MA, Aguida B, Jourdan N, Buddhachat K, Pooam M. **2023**. Kryptochróm a kvantová biológia: odhaľovanie tajomstiev magnetorecepcie rastlín. *Front Plant Sci*. 14:1266357. doi:10.3389/fpls.2023.1266357. Thoradit T, Chabi M, Aguida B, Baouz S, Stierle V, Pooam M, Tousaints S, Akpovi CD, Ahmad M. **2024**. Precitlivosť na elektromagnetické polia vytvorené človekom (EHS) koreluje s imunitnou odpoveďou na oxidačný stres: kazuistika. *Commun Integr Biol*. 17(1):2384874. robím ja: 10.1080/19420889.2024.2384874.
- Tomanová K, Vácha M. **2016**. Magnetická orientácia Antarktídy amfipod *Gondogeneia antarcticae* rušený veľmi slabými rádiokvencnými poľami. *J Exp Biol*. 219(Pt 11):1717–1724. doi:10.1242/jeb.132878. Touitou Y, Selmaoui B. **2012**. Účinky extrémne nízkej frekvencie magnetické polia na melatonín a kortizol, dva markerové rytmy cirkadiálneho systému. *Dialógy Clin Neurosci*. 14(4):381-399. doi: 10.31887/DCNS.2012.14.4/ytouitou.
- Tuor M, Ebert S, Schuderer J, Kuster N. **2005**. Hodnotenie expozície ELF z mobilných telefónov GSM a vývoj optimalizovaného nastavenia vystavenia RF/ ELF pre štúdie ľudských dobrovoľníkov. Zürich Švajčiarsko: Nadácia pre výskum informačných technológií v spoločnosti. Správa: BAG Reg. č. 23.02.-18/02.001778, Zürich, január 2005.
- Usselman RJ, Hill I, Singel DJ, Martino CF. **2014**. Modifikácia spinovej biochémie uluje produkciu reaktívnych foriem kyslíka (ROS) rádiokvencnými magnetickými poľami. *PLoS One*. 9(3):e93065. doi:10.1371/journal.pone.0093065. Usselman RJ, Chavarriaga C, Castello PR, Procopio M, Ritz T, Dratz EA, Singel DJ, Martino CF. **2016**. Kvantová biológia delenia reaktívnych foriem kyslíka ovplyvňuje bunkovú bioenergetiku. *Sci Rep*. 6(1):38543. doi:10.1038/srep38543.
- van der Horst GT, Muijtjens M, Kobayashi K, Takano R, Kanno S, Takao M, de Wit J, Verkerk A, Eker AP, van Leenen D, a kol. **1999**. Cicavce Cry1 a Cry2 sú nevyhnutné na udržanie cirkadiálnych rytmov. *Príroda*. 398(6728):627–630. doi:10.1038/19323.
- Vanderstraeten J, Burda H. **2012**. Sprostredkuje magnetorecepcia bio - logické efekty magnetických poľ silovej frekvencie? *Sci Total Environ*. 417-418:299-304. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.08.071. Vanderstraeten J, Verschaeve L, Burda H, Bouldand C., de Brouwer C. **2012**. Účinky extrémne nízkofrekvenčných magnetických poľ na zdravie: prehodnotenie hypotézy melatonínu vo svetle aktuálnych údajov o magnetoreceptii. *J Appl Toxicol*. 32(12):952-958. doi:10.1002/jat.2761.
- Vanderstraeten J, Burda H, Verschaeve L, De Brouwer C. **2015**. Mohol by mag - netické polia ovplyvňujú funkciu cirkadiálnych hodín kryptochrómov? Testovanie základného predpokladu hypotézy kryptochrómu (ELF magnetické polia). *Health Phys*. 109(1): 84-89. doi:10.1097/HP.0000000000000292. Vieira CLZ, Chen K, Garshick E, Liu EM, Vokonas P, Ljungman P, Schwartz J, Koutrakis P. **2022**. Geomagnetické poruchy znižujú variabilitu srdcovej frekvencie v normatívnej štúdií starnutia. *Sci Total Environ*. 839:156235. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156235.
- Vieira J, Jones AR, Danon A, Sakuma M, Hoang N, Robles D, Tait S, Heyes DJ, Picot M, Yoshii T a spol. **2012**. Ľudský kryptochróm-1 udeľuje na svetle nezávislú biologickú aktivitu v transgénnej *Drosophila* korelovanú so stabilitou flavínového radikálu. *PLoS One*. 7(3):e31867. doi:10.1371/journal.pone.0031867.
- Wan G, Liu R, Li C, He J, Pan W, Sword GA, Hu G, Chen F. **2020**. Zmeniť v intenzite geomagnetického poľa mení vlastnosti súvisiace s migráciou u stáhovavého hmyzu. *Biol Lett*. 16(4):20190940. doi:10.1098/rsbl.2019.0940.
- Wang CX, Hilburn IA, Wu DA, Mizuhara Y, Cousté CP, Abrahams JNH, Bernstein SE, Matani A, Shimojo S, Kirschvink JL. **2019**. Transdukcia geomagnetického poľa, ako je dokázané z aktivity alfa - pásma v ľudskom mozgu. *eNeuro*. 6(2):ENEURO.0483-18.2019. e048323. doi:10.1523/ENEURO.0483-18.2019.
- West KE, Jablonski MR, Warfield B, Cecil KS, James M, Ayers MA, Maida J, Bowen C, Sliney DH, Rollag MD a kol. **2011**. Modré svetlo z diód vyžarujúcich svetlo vyvoláva u ľudí potlačenie melatonínu závislé od dávky. *J Appl Physiol* (1985). 110(3):619-626. doi:10.1152/jappphysiol.01413.2009.
- Wever R. **1979**. Cirkadiálny systém človeka – výsledky experimentov v časovej izolácii. New York (NY): Springer.
- Weydahl A, Sothorn RB, Cornélissen G, Wetterberg L. **2000**. Geomagnetické aktivity ovplyvňuje sekréciu melatonínu v zemepisnej šírke 70° N. *Biomed Pharmacolher*. 55:s57–s62. doi:10.1016/S0753-3322(01)90006-X. SZO.2005.
- Informačný list č. 296: Elektromagnetické polia a verejný zdravie. Svetová zdravotnícka organizácia. [prístup 14. augusta 2024]. [http://www.emfandhealth.com/WHO\\_EMSSensitivity.pdf](http://www.emfandhealth.com/WHO_EMSSensitivity.pdf).
- Wiltschko R, Wiltschko W. **2009**. RECENZIA: vtáčia navigácia. *The Auk*. 126(4): 717-743. doi:10.1525/auk.2009.11009.
- Wiltschko R, Ahmad M, Nießner C, Gehring D, Wiltschko W. **2016**. Magnetorecepcia závislá od svetla u vtákov: zásadný krok nastáva v tme. *Rozhranie JR Soc*. 13(118):20151010. doi:10.1098/rsif.2015.1010.
- Wiltschko R, Nießner C, Wiltschko W. **2021**. Magnetický kompas vtáky: úloha kryptochrómu. *Predný Physiol*. 12:667000. doi:10.3389/fphys.2021.667000.
- Winklhofer M. **2009**. Fyzika transdukcie geomagnetického poľa v mals. *IEEE Trans Magn*. 45(12):5259-5265. doi:10.1109/TMAG.2009.2017940. Xu S, Kong X, Liu J. **2021**. Expresia génu CRY2 v mozgu je súvisiace s ľudskou navigáciou. *Predný Radiol*. 1:731070. doi:10.3389/fradi.2021.731070.
- Zadeh Haghighi H, Simon C. **2021**. Zapletení radikáli môžu vysvetliť Účinky lítia na hyperaktivitu. *Sci Rep*. 11(1):12121. doi:10.1038/s41598-021-91388-9.



- Zadeh-Haghighi H, Simon C.2022. Účinky magnetického poľa v biológii z pohľadu mechanizmu radikálových párov. Rozhranie JR Soc. 19(193):20220325. doi:10.1098/rsif.2022.0325.
- Zeitler JM, Khalsa SBS, Boivin DB, Duffy JF, Shanahan TL, Kronauer RE, Czeisler CA.2005. Časová dynamika neskorej nočnej fotografickej stimulácie ľudského cirkadiálneho časovacieho systému. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 289(3):R839-844. doi:10.1152/ajpregu.00232.2005. Zhang B, Wang L, Zhan A, Wang M, Tian L, Guo W, Pan Y.2021. Dlhodobé vystavenie hypomagnetickému poľu utlmuje hipokampálnu neurogenézu a kogníciu dospelých. Nat Commun. 12(1):1174. doi:10.1038/s41467-021-21468-x.
- Zhang L, Malkemper EP.2023. Kryptochrómy u cicavcov: magnetorecepcia mylná predstava. Predný Physiol. 14:1250798. doi:10.3389/fphys.2023.1250798.
- Zhao L, Liu X, Wang C, Yan K, Lin X, Li S, Bao H, Liu X.2014. Expozícia magnetickým poľami a riziko detskej leukémie: metaanalýza založená na 11 699 prípadoch a 13 194 kontrolách. Leuk Res. 38(3):269-274. doi:10.1016/j.leukres.2013.12.008.
- Zhou Y, Tong T, Wei M, Zhang P, Fei F, Zhou X, Guo Z, Zhang J, Xu H, Zhang L, a kol.2023. Smerom k magnetizmu u holubov MagR: viazanie železa a železa a síry funguje nevyhnutne a synergicky. Zool Res. 44 (1): 142-152. doi:10.24272/j.issn.2095-8137.2022.423. Zufry H, Rudijanto A, Soeatmadji DW, Sakti SP, Munadi K, Sujuti H, Mintaroem K.,...2023. Účinky elektromagnetického žiarenia mobilného telefónu na štítnu žľazu a hormóny v mozgu Rattus norvegicus: analýza funkcie štítnej žľazy, reaktívnych foriem kyslíka a monokarboxylátového transportéra 8. J Adv Pharm Technol Res. 14(2):63-68. doi:10.4103/japtr.japtr\_680\_22.

## Príloha A

### *Energia v elektromagnetických poliach a fotónoch vo vzťahu k životu na Zemi*

Okrem slnečného žiarenia sa život na Zemi vyvinul v elektromagnetickej tichom prostredí. Nízko-frekvenčné EM polia

pochádzajú z prúdov cirkulujúcich v jadre Zeme, slnečných vetrov a búrkovej činnosti. Za posledných 100 rokov antropogénne aktivity výrazne zvýšili úrovne environmentálnych časovo premenných elektrických a magnetických polí.

**Obrázok 1** zobrazuje nízko-frekvenčné úrovne MF (0,01–10 000 Hz) s dlhými vlnovými dĺžkami (30 Gm @ 0,01 Hz až 3 km @ 10 kHz). Pri týchto vlnových dĺžkach nie sú elektrické a magnetické polia matematicky spojené – jedno môže existovať bez druhého – a táto oblasť je známa ako reaktívne blízke pole.

**Obrázok 2** ukazuje obrovský nárast environmentálnej hustoty rádiofrekvenčného výkonu (PD) v širokom frekvenčnom rozsahu. Nad približne 10 MHz sú ľudia vo všeobecnosti vystavení vzdialeným poľami, kde sú elektrické a magnetické polia matematicky spojené. Špička RF, najmä vďaka moderným telekomunikačným signálom, leží medzi 300 MHz a 30 GHz, teda v „tichej“ časti spektra prirodzeného šumu. Moderný vrchol PD je približne 10-krát väčší.

Na prenos RF signálu sa na anténu aplikuje oscilačný potenciál pri danej frekvencii. Z hľadiska *klasikkej fyziky* To vedie k emisii a šíreniu EMR, v ktorom sú elektrické a magnetické polia zložito prepojené Maxwellovými rovnicami. *V kvantovej fyzike* Vo svete sú rádiové vlny „prúdy fotónov“, ktoré sú zvyčajne vysoko koherentné a lineárne alebo kruhovo polarizované. Sčítajú sa superpozíciou vln v n-fotónovom vlnovom slede.

Celkové hladiny RF PD sú teraz podobné ako pri jasnom slnečnom svetle. Jednotlivé RF fotóny majú oveľa menej energie, ale na každý slnečný fotón ich pripadá najmenej 100 000. Celková energia sa vypočíta integrovaním PD cez príslušnú šírku pásma.

Na základe energetických úvah je ročná absorbovaná dávka z prirodzeného ionizujúceho žiarenia na pozadí približne 2 mGy, čo zahŕňa prenos 2 mJ kg<sup>-1</sup> do tkaniva.

Aktuálna SAR mobilného telefónu ICNIRP je 2 W kg<sup>-1</sup>, čo predstavuje celkový prenos energie 2000 mJ kg<sup>-1</sup> za sekundu (= 2 J kg<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>), aj keď z fotónov s pomerne nízkou individuálnou energiou. Možné dlhodobé účinky tohto masívneho nového prílevu fotónovej energie na blaho človeka nemožno ľahko vylúčiť. Ďalšiu diskusiu možno nájsť tu (Roussel2024; Bruno2024).