

Jolanta Karpowicz, Artur Pałasz, Ryszard Wiaderkiewicz

Wpływ promieniowania elektromagnetycznego

na ośrodkowy układ nerwowy



Jolanta Karpowicz, Artur Pałasz, Ryszard Wiaderkiewicz

Wpływ promieniowania elektromagnetycznego na ośrodkowy układ nerwowy

Warszawa 2022

CIOP  **PIB**

Wpływ promieniowania elektromagnetycznego na ośrodkowy układ nerwowy

Ryszard Wiaderkiewicz¹, Artur Pałasz¹, Jolanta Karpowicz²

Katedra Histologii i Embriologii Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach¹, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie²

Właściwe funkcjonowanie układu nerwowego jest kluczowe dla funkcjonowania człowieka zarówno w życiu codziennym jak i zawodowym. Czynniki, które bezpośrednio lub pośrednio uszkadzają tkankę nerwową, a w szczególności ośrodkowy układ nerwowy, mogą prowadzić do poważnych zaburzeń neurologicznych. Układ nerwowy działa poprzez przesyłanie sygnałów elektrycznych. Wydaje się więc oczywistym, że ekspozycja na pole elektromagnetyczne może ingerować w jego działanie prowadząc do różnych zmian neurologicznych. Wiele badań wskazuje, że ekspozycja na pole EM indukuje zmiany morfologiczne w tkance nerwowej, wpływa na ekspresję ważnych czynnościowo neuropeptydów, a w rezultacie wielu ważnych dla życia procesów. W życiu codziennym narażeni jesteśmy na promieniowanie EM z różnych źródeł, często o krańcowo różnych zakresach częstotliwości: od bardzo wysokich rzędu THz (skanery rezonansu magnetycznego), poprzez częstotliwości radiowe rzędu 100 kHz – kilka GHz (telefony komórkowe), do bardzo niskich częstotliwości na poziomie kilkudziesięciu Hz (linie wysokiego napięcia, stacje transformatorowe). Częstotliwość promieniowania EM ma istotny wpływ na obserwowane efekty. Przykładowo, o ile w przypadku promieniowania elektromagnetycznego o bardzo niskich częstotliwościach (ELF-EMF) jego wpływ na zmiany neurologiczne wykazano aż w 90% spośród 105 prac opublikowanych w ostatnim dziesięcioleciu, to w przypadku promieniowania o częstotliwości radiofalowej (RF-EMF) jedynie w 68% spośród ponad 200 publikacji. Eksperymentalne badania wpływu pól elektromagnetycznych o częstotliwości radiofalowej na ośrodkowy układ nerwowy prowadzone są w warunkach wykluczających ewentualny udział efektu termicznego. W takich warunkach na ogół nie obserwuje się zmian morfologicznych w mózgu, natomiast oczywisty wydaje się wpływ RF-EMF na aktywność behawioralną. Warto przy tym zauważyć ciekawą zależność: efekty oddziaływania RF-EMF na układ nerwowy potwierdzają niemal wszystkie badania prowadzone na zwierzętach, podczas gdy tylko bardzo nieliczne sugerują taki wpływ u ludzi. Może to być spowodowane z jednej strony większą wrażliwością gryzoni (zwierzęta eksperymentalne to

głównie szczury lub myszy) niż człowieka na pole EM aczkolwiek wydaje się, że należy brać pod uwagę także inne czynniki. Przede wszystkim, w badaniach na zwierzętach poziomy ekspozycji (jak również czas ekspozycji) są na ogół znacznie większe niż u ludzi, a poza tym znacznie łatwiej je kontrolować. W przypadku jednorazowej ekspozycji na silne pole EM o częstotliwości radiowej zmiany neurologiczne i behawioralne odnotowano zarówno u zwierząt jak i ludzi. Wiele badań na zwierzętach poświęconych było wpływowi pól EM częstotliwości radiowej na takie aktywności mózgu jak uczenie się i pamięć, procesy w których główną rolę odgrywa część mózgu zwana hipokampem. Wiele badań wykazało, że RF-EMF indukuje zmiany morfologiczne w rejonie hipokampa i wpływa na zależne od niego procesy (1). Mechanizm jest trudny do określenia. Szereg publikacji sugeruje, że ważną rolę może tu odgrywać stres oksydacyjny (2, 3, 4, 5, 6). Generalnie jednak należy stwierdzić, że wpływ promieniowania o częstotliwości radiowej na ośrodkowy układ nerwowy jest niewielki aczkolwiek, szczególnie odnośnie człowieka, jednoznaczna ocena wymaga jeszcze potwierdzenia przez precyzyjniej zaplanowane badania (zarówno eksperymentalne jak epidemiologiczne).

Na promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach radiofalowych narażeni są obecnie wszyscy, niezależnie od wieku czy stanowiska pracy. Na zagrożenia związane z ekspozycją na pole elektromagnetyczne o bardzo niskich częstotliwościach narażeni są głównie ludzie mieszkający w bezpośrednim sąsiedztwie stacji transformatorowych i zatrudnieni na stanowiskach wymagających przebywania w bezpośredniej bliskości urządzeń emitujących takie pole (np. spawacze).

Większość prac eksperymentalnych wskazuje, że ekspozycja w polu elektromagnetycznym o bardzo niskich częstotliwościach wpływa na szereg procesów przebiegających w ośrodkowym układzie nerwowym. Komórki nerwowe „porozumiewają” się ze sobą za pośrednictwem niewielkich, wydzielanych przez nie cząsteczek (neurotransmitery, neuropeptydy), które oddziałują ze swoistymi receptorami ulokowanymi w błonach komórkowych innych neuronów. Czynniki zewnętrzne modyfikując aktywność komórek nerwowych wpływają na zmiany w poziomie ekspresji zarówno receptorów jak i ich ligandów. Wykazano, że długotrwała ekspozycja na ELF-EMF wpływa na ekspresję receptorów NMDA w formacji hipokampa u szczurów (7). W innej pracy wykazano, że zmiany w zachowaniach behawioralnych zwierząt eksponowanych na ELF-EMF korelują ze zmianami w ekspresji receptorów NMDA w mózgu (8). Są doniesienia o wpływie ekspozycji w polu magnetycznym na ekspresję receptorów serotoninowych i dopaminowych w mózgu jak również zmianie podtypu receptora 5HT(2A) w korze przedczołowej zwierząt (9). Informacja ta jest to o tyle ważna, że powyższy receptor wydaje się być powiązany z rozwojem depresji u ludzi. Objawy podobne do występujących w

depresji u ludzi obserwowano u myszy i szczurów chronicznie eksponowanych na pole magnetyczne (10).

Eksperymentalne badania dotyczące wpływu ELF-EMF na układ nerwowy człowieka są nieliczne i dotyczą głównie oceny funkcji mózgu (EEG, obrazowanie funkcjonalne). Choć prace te prowadzone były na stosunkowo nielicznych grupach ochotników (kilkanaście do kilkudziesięciu osób) to jednak wykazały, że ekspozycja ludzi na ELF-EMF może modulować pracę mózgu (11,12,13,14). Obiektywne trudności metodyczne sprawiają, że w przypadku ludzi w badaniach dotyczących wpływu ELF-EMF na ośrodkowy układ nerwowy i związane z tym choroby dominują badania epidemiologiczne. Szeroko zakrojone badania zależności pomiędzy ekspozycją pracowników i mieszkańców na pole EM generowane przez linie wysokiego napięcia, a ryzykiem wystąpienia chorób neurodegeneracyjnych przeprowadzono ostatnio w Danii. W swojej pracy autorzy przeanalizowali przypadki 2000 osób z chorobą motoneuronów, 8000 ze stwardnieniem rozsianym, 16 tys. z chorobą Parkinsona i 20 tys. z chorobą Alzheimera. Wykazano pozytywną korelację pomiędzy zamieszkiwaniem lub pracą w odległości poniżej 50 m od linii wysokiego napięcia, a chorobą Alzheimera lecz jedynie w najstarszej grupie wiekowej (65-74 lata) (15). Najnowsze badania na dużej populacji (300 tys.) pracowników zatrudnionych w USA w zawodach branży elektronicznej nie wykazały zwiększonej śmiertelności z powodu choroby motoneuronów (16). Analiza publikacji badających zależność pomiędzy ekspozycją pracowników w polu ELF-EMF, a chorobami neurodegeneracyjnymi wskazuje, że pomimo istotnych różnic w metodach pomiarów i badanych parametrów, zawodowa ekspozycja na ELF-EMF koreluje z zachorowalnością na chorobę motoneuronów i chorobę Alzheimera, natomiast nie koreluje z chorobą Parkinsona, stwardnieniem rozsianym czy demencją (18). Badania wpływu zawodowej ekspozycji w polu ELF-EMF na zaburzenia poznawcze wykazały, że w grupie pracowników najbardziej narażonych (głównie krawcowe i spawacze) ilość osób z badanymi zaburzeniami była ponad dwukrotnie większa niż w grupie przypisanej do zawodów o mniejszym narażeniu (5% vs 2%) (19).

Trudności metodologiczne sprawiają, że zdecydowana większość prac eksperymetalnych mających na celu ocenę zagrożeń uszkodzeń centralnego układu nerwowego przez ELF-EMF jak i potencjalnych mechanizmów tych uszkodzeń prowadzona jest na zwierzętach (badania in vivo) lub hodowlach komórkowych (badania in vitro). Wyniki badań nie są jednoznaczne choć sugerują, że ekspozycja w polu ELF-EMF wpływa na procesy pamięci, uczenia się i nietypowe zachowania zwierząt w testach behawioralnych (20,21). Mechanizmy leżące u podłoża obserwowanych efektów behawioralnych nie są do końca poznane, choć wykazano, że korelują one ze zmianami w ekspresji specyficznych receptorów w różnych strukturach mózgu (8,9). U

myszokoczków indukowane ekspozycją zmiany behawioralne korelowały ze zróżnicowaną ekspresją neurotransmiterów w strukturach mózgu kontrolujących eksploracyjną aktywność tych zwierząt (8).

Szereg badań wskazuje, że istotną rolę w indukcji różnych zaburzeń w obrębie ośrodkowego układu nerwowego wskutek ekspozycji w ELF-EMF odgrywa stres oksydacyjny. W większości badań ekspozycja zwierząt w polach 50 Hz, powyżej 100 uT skutkowałą obniżeniem ekspresji enzymów antyoksydacyjnych (dysmutaza nadadtlenkowa, katalaza, peroksydaza glutationowa) z jednoczesnym wzrostem ilości wolnych rodników (22-25). Obserwowane efekty zależą zarówno od natężenia pola jak i badanego rejonu mózgu.

Od wielu lat wiadomo, że nie tylko u osobników młodych ale też w pełni dojrzałych, mózg posiada istotne zdolności regeneracyjne dzięki samoodnawialnej populacji niskozróżnicowanych komórek mogących w odpowiednich warunkach różnicować się zarówno do komórek glejowych jak i nerwowych. Wpływ ekspozycji na pole elektromagnetyczne, na proces neurogenezy w mózgu jest słabo poznany, pomimo że we współczesnym świecie pola elektromagnetyczne stały się zjawiskiem powszechnym. Są emitowane przez urządzenia nadawcze (nadajniki telewizyjne, telekomunikacyjne, aparaty komórkowe), urządzenia przemysłowe (piece indukcyjne czy zgrzewarki) i medyczne (fizykoterapeutyczne czy diagnostyki rezonansu magnetycznego), a także różnorodne urządzenia i instalacje jak linie elektroenergetyczne czy sieć trakcyjna pojazdów szynowych. Dotychczas nieznane są skutki zanieczyszczenia środowiska polami elektromagnetycznymi dla procesów neuroplastyczności w ośrodkowym układzie nerwowym, w tym zarówno neurogenezy jak i neurodegeneracji. Wyniki badań epidemiologicznych wskazują na możliwość ich upośledzenia, szczególnie przy przewlekłym oddziaływaniu pola magnetycznego, przejawiającego się we wzmożonym rozwoju np. choroby Alzheimera (26,27). Wiele grup zawodowych może być szczególnie narażonych na działanie pola magnetycznego. Jedną z grup najsilniej narażonych są elektrokardiolodzy i pielęgniarki, pracujący w pracowniach rezonansu magnetycznego. Nie wiadomo czy, a jeżeli tak to w jakim stopniu, pole magnetyczne ma wpływ na dwa przeciwstawne procesy neurodegeneracji i regeneracji w ośrodkowym układzie nerwowym (OUN). Układ nerwowy w związku z dużą względną przewodnością elektryczną tkanki nerwowej w porównaniu z innymi tkankami organizmu, jest potencjalnie szczególnie podatny na skutki oddziaływania pola magnetycznego. Wykazano, że przewlekłe ekspozycje myszy i szczurów na pola elektromagnetyczne powoduje zmiany mikroskopowe w mózgu, przypominające zmiany w chorobie Alzheimera, co może świadczyć o pro-neurodegeneracyjnym działaniu przewlekłej ekspozycji na pola (28).

Warto również wspomnieć o badaniach *in vitro*, w których stosując linie komórkowe lub hodowle pierwotne zarówno neuronów jak i komórek glejowych bada się wpływ pól elektromagnetycznych na takie parametry jak przeżywalność komórek, różnicowanie, ekspresję markerów stanu zapalnego, przekaźnictwo synaptyczne i inne. Wyniki badań różnią się w zależności od zastosowanego modelu i warunków ekspozycji jednak niemal wszystkie wykazują wpływ pola ELF-EMF na badane parametry. W przypadku nowotworowych komórek embrionalnych P19 wykazano, że mogą różnicować się do neuronów przy wartościach indukcji pola magnetycznego powyżej 10 mT (29). Z kolei w hodowli pierwotnej neuronów korowych izolowanych z nowonarodzonych myszy 12 dniowa ekspozycja w polu o wartości indukcji 1 mT zwiększała ekspresję i aktywność typowych markerów neuronalnych jak kanały wapniowe regulowane napięciem (30). W badaniu, gdzie oceniano wpływ ELF-EMF (50 Hz, 1 mT) na potencjał różnicowania zarówno mysich embrionalnych komórek macierzystych jak i ludzkich mezenchymalnych komórek macierzystych wykazano, że kilkudniowa ekspozycja (odpowiednio 8 lub 6 dni) istotnie zmienia ekspresję 57 z badanych genów. Większość z tych genów kodowała czynniki transkrypcyjne, w tym związane z neurogenezą takie jak *Egr1* (31). Podobne wyniki, sugerujące że ELF-EMF wpływa na proces różnicowania komórek nerwowych otrzymano także w innych badaniach prowadzonych na hodowlach komórkowych (32-34).

Pomimo wielu danych otrzymanych w wyniku prac eksperymentalnych prowadzonych zarówno w warunkach *in vitro* jak *in vivo* wskazujących, że pole ELF-EMF może wpływać na centralny układ nerwowy modyfikując chociażby ekspresję licznych genów, w tym genów odpowiedzialnych za powstawanie nowych neuronów, trudno obecnie wysunąć konkluzje odnośnie potencjalnego udziału ELF-EMF w rozwoju zaburzeń prowadzących do rozwoju chorób neurodegeneracyjnych.

Zalecenia profilaktyczne

Dotychczas nieznane są skutki zanieczyszczenia środowiska polami elektromagnetycznymi dla procesów neuroplastyczności w ośrodkowym układzie nerwowym, w tym zarówno neurogenezy jak i neurodegeneracji. Narażenie na silne pola magnetyczne może być czynnikiem ryzyka zawodowego. Nie wiadomo czy, a jeżeli tak to w jakim stopniu, pole magnetyczne ma wpływ na dwa przeciwstawne procesy neurodegeneracji i regeneracji w ośrodkowym układzie nerwowym (OUN).

Chociaż badania eksperymentalne dotyczące wpływu pola magnetycznego, szczególnie pól o bardzo niskich częstotliwościach (ELF-EMF) na układ nerwowy człowieka są nieliczne to jednak wykazały, że ekspozycja ludzi na ELF-EMF może modulować pracę mózgu. Także badania epidemiologiczne dotyczące zależności pomiędzy ekspozycją pracowników i mieszkańców na ELF-EMF, a ryzykiem wystąpienia różnych chorób neurodegeneracyjnych nie wykluczają pozytywnej korelacji pomiędzy zamieszkiwaniem lub pracą w pobliżu źródeł ELF-EMF, a zachorowalnością na stwardnienie zanikowe boczne (najczęstsza forma choroby motoneuronów) czy chorobę Alzheimera lub Parkinsona. Wiele aktywnych zawodowo osób pracujących w warunkach ekspozycji na ELF-EMF przyjmuje jednocześnie leki antydepresyjne lub antypsychotyczne. Chociaż brak jest opracowań odnośnie ewentualnej interakcji pól magnetycznych z lekami stosowanymi w leczeniu zaburzeń psychiatrycznych nasze własne badania prowadzone na modelu zwierzęcym wykazały, że taka interakcja jest możliwa. Ekspozycja na pole EM negatywnie wpływała na neurogenezę, niwelując jednocześnie pozytywny wpływ badanych leków jak haloperidol, chlorpromazyna czy escitalopram - lek przeciwdepresyjny najnowszej generacji. Wykazaliśmy również, że pole EM w znacznym stopniu niweluje pozytywne efekty działania escitalopramu na tak podstawowe procesy behawioralne jak zachowania lękowe zwierząt czy ich gotowość do podjęcia eksploracji nieznanego otoczenia. Co ważne negatywny wpływ pola widoczny był zarówno w grupie zwierząt eksponowanych na pole porównywalne z limitem narażenia pracowników (1370 μ T, 100V/m) ale również w grupie eksponowanej na pole znacznie słabsze, porównywalne z limitem narażenia ludności (78 μ T, 10V/m). Dlatego też uważamy, że osoby pracujące w warunkach ekspozycji na pole magnetyczne powinny ograniczyć czas przebywania w bezpośredniej bliskości źródła pola, nawet jeżeli pomiary wskazują, że zgodnie z obowiązującymi normami poziom ekspozycji jest akceptowalny. Dotyczy to szczególnie osób, które przyjmują jednocześnie leki przeciwpysychotyczne lub przeciwdepresyjne, gdyż istnieje prawdopodobieństwo, że skuteczność tych leków będzie ograniczona. Należy mieć

świadomość, że brak w tej chwili precyzyjnych danych odnośnie interakcji indywidualnych leków z polem elektromagnetycznym w kontekście zmian indukowanych w ośrodkowym układzie nerwowym. Dlatego też wskazane jest aby pracownicy narażeni na ekspozycję mieli świadomość, że pole EM może w różnym stopniu modyfikować aktywność każdego z leków stosowanych w leczeniu zaburzeń psychiatrycznych, w tym depresji, a tym samym generować nieuniknione, choć nie do końca zdefiniowane efekty uboczne.

Piśmiennictwo:

1. Bas O, Odaci E, Mollaoglu H, Ucock K, Kaplan S (2009b). Chronic prenatal exposure to the 900 megahertz electromagnetic field induces pyramidal cell loss in the hippocampus of newborn rats. *Toxicol Ind Health*, 25(6), 377-84.
2. Aït-Aïssa S, Billaudel B, Poullétier de Gannes F (2012). In utero and early-life exposure of rats to a Wi-Fi signal: screening of immune markers in sera and gestational outcome. *Bioelectromagnetics*, 33 (5) 410 - 20.
3. Deshmukh PS, Banerjee BD, Abegaonkar MP, Megha K, Ahmed RS, Tripathi AK, MedirattaPK (2013). Effect of low level microwave radiation exposure on cognitive function and oxidative stress in rats. *Indian J Biochem Biophys*, 50(2), 114-9.
4. Eser O, Songur A, Aktas C, Karavelioglu E, Caglar V, Aylak F, Ozguner F, Kanter M (2013). The effect of electromagnetic radiation on the rat brain: an experimental study. *Turk Neurosurg*, 23(6), 707-15.
5. Jing J, Yuhua Z, Xiao-qian Y, Rongping J, Dong-mei G, Xi C (2012). The influence of microwave radiation from cellular phone on fetal rat brain. *Electromagn Biol Med*, 31(1), 57-66.
6. Nazıroğlu M, Çelik Ö, Özgül C, Çiğ B, Doğan S, Bal R, Gümral N, Rodríguez AB, Pariente JA (2012). Melatonin modulates wireless (2.45 GHz)-induced oxidative injury through TRPM2 and voltage gated Ca(2+) channels in brain and dorsal root ganglion in rat. *Physiol Behav*, 105(3), 683-92.
7. Salunke BP, Umathe SN, Chavan JG (2013). Involvement of NMDA receptor in low-frequency magnetic field-induced anxiety in mice. *Electromagn Biol Med*, 33(4), 312-26.
8. Janać B, Selaković V, Rauš S, Radenović L, Zrnić M, ProlićZ (2012). Temporal patterns of extremely low frequency magnetic field-induced motor behavior changes in Mongolian gerbils of different age. *Int J Radiat Biol*, 88(4), 359-66.
9. Janać B, Tovilović G, Tomić M, Prolić Z, Radenović L (2009). Effect of continuous exposure to alternating magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) on serotonin and dopamine receptors activity in rat brain. *Gen Physiol Biophys, Special Issue*, 28, 41-6.
10. Kitaoka K, Kitamura M, Aoi S, Shimizu N and Yoshizaki K (2013). Chronic exposure to an extremely low-frequency magnetic field induces depression-like behavior and corticosterone secretion without enhancement of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in mice. *Bioelectromagnetics*, 34(1), 43-51. Plus Erratum in *Bioelectromagnetics*, 2013, 34(7), 562.
11. Amirifalah Z, Firoozabadi SM, Shafiei SA (2013). Local exposure of brain central areas to a pulsed ELF magnetic field for a purposeful change in EEG. *Clin EEG Neurosci*, 44(1), 44-52
12. Shafiei SA, Firoozabadi SM, Rasoulzadeh Tabatabaie K, Ghabaee M (2012). Study of the frequency parameters of EEG influenced by zone-dependent local ELF-MF exposure on the human head. *Electromagn Bio Med*, 31, 112-21.
13. Legros A, Corbacio M, Beuter A, Modolo J, Goulet D, Prato FS, Thomas AW (2011). Neurophysiological and behavioral effects of a 60Hz, 1,800 µT magnetic field in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 112, 1751-62.

14. Corbacio M, Brown S, Dubois S, Goulet D, Prato FS, Thomas AW, Legros AG (2011). Human Cognitive Performance in a 3 mT power-line frequency magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 32(8), 620-33.
15. Frei P, Poulsen AH, Mezei G, et al. (2013). Residential distance to high-voltage power lines and risk of neurodegenerative diseases: a Danish population-based case-control study. *Am J Epidemiol*, 177 (9), 970-8.
16. Parlett LE, Bowman JD, van Wijngaarden E (2011). Evaluation of occupational exposure to magnetic fields and motor neuron disease mortality in a population-based cohort. *J Occup Environ Med*, 53(12), 1447-51.
17. Zhou H, Chen G, Chen C, Yu Y, Xu Z., Association between extremely low-frequency electromagnetic fields occupations and amyotrophic lateral sclerosis: a meta-analysis., *PLoS One*. 2012;7(11):e48354.
18. Vergara X, Kheifets L, Greenland S, Oksuzyan S, Cho YS, Mezei G., Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and neurodegenerative disease: a meta-analysis., *J Occup Environ Med*. 2013 Feb;55(2):135-46.
19. Davanipour Z, Tseng CC, Lee PJ, Markides KS, Sobel E (2014). Severe Cognitive Dysfunction and Occupational Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure among Elderly Mexican Americans. *Br J Med Med Res*, 4, 1641-62.
20. Jadidi M, Firoozabadi SM, Rashidy-Pour A, Sajadi AA, Sadeghi H, Taherian AA (2007). Acute exposure to a 50 Hz magnetic field impairs consolidation of spatial memory in rats. *Neurobiol Learn Mem*, 88(4), 387-92.
21. Cui Y, Ge Z, Rizak JD, Zhai C, Zhou Z, Gong S, Che Y (2012). Deficits in water maze performance and oxidative stress in the hippocampus and striatum induced by extremely low frequency magnetic field exposure. *PLoS One*, 7(5), e32196.
22. Akdag MZ, Dasdag S, Ulukaya E, Uzunlar AK, Kurt MA, Taşkin A (2010). Effects of extremely low-frequency magnetic field on caspase activities and oxidative stress values in rat brain. *Biol Trace Elem Res*, 138(1-3), 238-49.
23. Martínez-Sámano J, Torres-Durán PV, Juárez-Oropeza MA, Verdugo-Díaz L (2012). Effect of acute extremely low frequency electromagnetic field exposure on the antioxidant status and lipid levels in rat brain. *Arch Med Res*, 43(3), 183-9.
24. Selaković V, Rauš Balind S, Radenović L, Prolić Z and Janać B (2013). Age-dependent effects of ELF-MF on oxidative stress in the brain of Mongolian gerbils. *Cell Biochem Biophys*, 66(3), 513-21.
25. Akdag MZ, Dasdag S, Uzunlar AK, Ulukaya E, Oral AY, Çelik N, Akşen F. Can safe and long-term exposure to extremely low frequency (50 Hz) magnetic fields affect apoptosis, reproduction, and oxidative stress?, *Int J Radiat Biol*. 2013 Dec;89(12):1053-60.
26. Hug K., Roosli M., Rapp R. Magnetic field exposure and neurodegenerative diseases--recent epidemiological studies. *SozPravantivmed*, 2006;51(4):210-20.
27. Huss A., Spoerri A., Egger M., Roosli M., Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am.J.Epidemiol*. 2009 Jan 15;169(2):167-75.

28. Chang IF, Hsiao HY. Induction of RhoGAP and pathological changes characteristic of Alzheimer's disease by UAHFEMF discharge in rat brain. *Curr Alzheimer Res.* 2005;2:559-569.
29. Saito T, Nitta H, Kubo O, Yamamoto S, Yamaguchi N, Akiba S, Honda Y, Hagihara J, Isaka K, Ojima T, Nakamura Y, Mizoue T, Ito S, Eboshida A, Yamazaki S, Sokejima S, Kurokawa Y, Kabuto M (2010). Power-frequency magnetic fields and childhood brain tumors: a case-control study in Japan. *J Epidemiol*, 20(1), 54-61.
30. Piacentini R, Ripoli C, Mezzogori D, Azzena GB, Grassi C (2008). Extremely low-frequency electromagnetic fields promote in vitro neurogenesis via upregulation of Ca(v)1-channel activity. *J Cell Physiol*, 215(1), 129-39.
31. Seong Y, Moon J, Kim J., Egr1 mediated the neuronal differentiation induced by extremely lowfrequency electromagnetic fields., *Life Sci.* 2014 Apr 25;102(1):16-27
32. Bai WF, Xu WC, Feng Y, Huang H, Li XP, Deng CY, Zhang MS (2013). Fifty-Hertz electromagnetic fields facilitate the induction of rat bone mesenchymal stromal cells to differentiate into functional neurons. *Cytotherapy*, 15(8), 961-70.
33. Cho SI, Nam YS, Chu LY, Lee JH, Bang JS, Kim HR, Kim HC, Lee YJ, Kim HD, Sul JD, Kim D, Chung YH, Jeong JH (2012). Extremely low-frequency magnetic fields modulate nitric oxide signaling in rat brain. *Bioelectromagnetics*, 33(7), 568-74.
34. Kim SK, Choi JL, Kwon MK, Choi JY, Kim DW (2013). Effects of 60Hz magnetic fields on teenagers and adults. *Environ Health*, 12, 42.

Opracowano na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.