

Elżbieta Ciejka^{1,2}Ewa Jakubowska³Paulina Żelechowska³Halina Huk-Kolega³Agata Kowalczyk³Anna Gorąca³

WPŁYW POLA MAGNETYCZNEGO O EKSTREMALNIE NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI NA ZAWARTOŚĆ GLUTATIONU W MIĘŚNIU POPRZECZNIE PRĄŻKOWANYM SZCZURA

EFFECT OF EXTREMELY LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELD ON GLUTATHIONE IN RAT MUSCLES

¹ Wyższa Szkoła Biznesu i Nauk o Zdrowiu w Łodzi / The Academy of Business Administration and Health Sciences, Łódź, Poland² Wojewódzki Zespół Zakładów Opieki Zdrowotnej Centrum Leczenia Chorób Płuc i Rehabilitacji w Łodzi / Provincial Team of Health Care Treatment Center of Lung Diseases and Rehabilitation in Łódź, Łódź, Poland
Oddział Rehabilitacji Ogólnoustrojowej / Department of Rehabilitation³ Uniwersytet Medyczny w Łodzi / Medical University of Łódź, Łódź, Poland
Katedra Fizjologii Doświadczalnej i Klinicznej, Zakład Fizjologii Krążenia / Experimental and Clinical Physiology, Department of Cardiovascular Physiology

STRESZCZENIE

Wstęp: Wolne rodniki to atomy, cząsteczki lub ich fragmenty, których nadmiar prowadzi do rozwoju stresu oksydacyjnego, będącego przyczyną wielu chorób, m.in. nowotworowych, neurodegeneracyjnych i zapalnych, oraz starzenia się organizmu. Głównymi egzogennymi źródłami wolnych rodników są m.in. zanieczyszczenia przemysłowe, dym tytoniowy, promieniowanie jonizujące, ultradźwięki i pole magnetyczne. Pole magnetyczne niskiej częstotliwości powszechnie stosowane jest w terapii fizykalnej. Celem pracy była ocena wpływu pola magnetycznego niskiej częstotliwości (extremely low frequency magnetic field – ELF-MF), stosowanego w magnetoterapii, na zawartość glutationu całkowitego, utlenionego i zredukowanego oraz stanu redoks w komórce mięśnia poprzecznie prążkowanego w zależności od czasu działania pola. **Materiał i metody:** Materiał badawczy stanowiły szczury, samce o wadze 280–300 g. Zwierzęta podzielono na 3 grupy badawcze: I – grupa kontrolna, II grupa – poddana 30 min/dzień przez 2 tygodnie działaniu pola magnetycznego o parametrach: 7 mT i 40 Hz, III grupa – poddana 60 min/dzień przez 2 tygodnie działaniu pola magnetycznego o parametrach: 7 mT i 40 Hz. U zwierząt oznaczono glutation całkowity, utleniony i zredukowany oraz stan redoks w homogenatach tkanki mięśniowej po zakończeniu ekspozycji na działanie pola magnetycznego. **Wyniki:** Ekspozycja szczurów 30 min/dzień i 60 min/dzień przez 2 tygodnie na pole magnetyczne o parametrach 40 Hz i 7 mT powodowało istotny wzrost stężenia glutationu całkowitego w mięśni poprzecznie prążkowanym w porównaniu z wynikami grupy kontrolnej ($p < 0,001$). **Wnioski:** Uzyskane wyniki sugerują, że glutation odgrywa ważną rolę w ochronie tkanek przed polem magnetycznym. Ekspozycja na pole magnetyczne stosowane w magnetoterapii prowadzi do rozwoju mechanizmów adaptacyjnych, których celem jest utrzymanie równowagi oksydacyjno-redukcyjnej organizmu, i zależy od czasu ekspozycji. Med. Pr. 2014;65(3):343–349

Słowa kluczowe: pole magnetyczne ekstremalnie niskiej częstotliwości, ELF-MF, glutation

ABSTRACT

Background: Free radicals (FR) are atoms, molecules or their fragments. Their excess leads to the development of oxidizing stress, the cause of many neoplastic, neurodegenerative and inflammatory diseases, and aging of the organism. Industrial pollution, tobacco smoke, ionizing radiation, ultrasound and magnetic field are the major FR exogenous sources. The low frequency magnetic field is still more commonly applied in the physical therapy. The aim of the presented study was to evaluate the effect of extremely low frequency magnetic field used in the magnetotherapy on the level of total glutathione, oxidized and reduced, and the redox state of the skeletal muscle cells, depending on the duration of exposure to magnetic field. **Material and Methods:** The male rats, weight of 280–300 g, were randomly divided into 3 experimental groups: controls (group I) and treatment groups exposed to extremely low frequency magnetic field (ELF-MF) (group II exposed to 40 Hz, 7 mT for 0.5 h/day for 14 days and group III exposed to 40 Hz, 7 mT for 1 h/day for 14 days). Control rats were kept in a separate room not exposed to extremely low frequency magnetic field. Immediately after the last exposure, part of muscles was taken under pentobarbital anesthesia. Total glutathione, oxidized and reduced, and the redox state in the muscle tissue of animals were determined after exposure to magnetic fields. **Results:** Exposure to low magnetic field: 40 Hz, 7 mT for 30 min/day and 60 min/day for 2 weeks significantly increased the total glutathione levels in the skeletal muscle compared to the control group ($p < 0.001$). **Conclusions:** Exposure to magnetic fields used in the magnetic therapy plays an important role in the development of adaptive mechanisms responsible for maintaining the oxidation-reduction balance in the body and depends on exposure duration. Med Pr 2014;65(3):343–349

Key words: extremely low frequency magnetic field, ELF-MF, glutathione

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Elżbieta Ciejka, Oddział Rehabilitacji Ogólnoustrojowej, Specjalistyczny Szpital Gruźlicy, Chorób Płuc i Rehabilitacji, ul. Szpitalna 5, 95-080 Tuszyń, e-mail: elzbieta.ciejka@gmail.com
Nadesłano: 15 maja 2014, zatwierdzono: 18 czerwca 2014

WSTĘP

Wolny rodnik to atom lub cząsteczka, która na swojej powłoce walencyjnej ma 1 lub kilka niesparowanych elektronów. Z tego powodu wolny rodnik ma wysoką reaktywność i przyjmuje elektrony z otaczających cząsteczek, a wówczas cząsteczka pozbawiona elektronu sama staje się wolnym rodnikiem. Wiele takich przemian prowadzi do powstania łańcuchowej reakcji oksydoredukcyjnej (1).

W organizmie żywym źródłem wolnych rodników tlenowych są procesy oddechowe komórki. W trakcie takiego procesu ok. 1–5% tlenu ulega niecałkowitej redukcji, a końcowymi produktami tej reakcji są reaktywne formy tlenu (RFT). W warunkach fizjologicznych RFT biorą udział w wielu reakcjach metabolicznych organizmu, np. uczestniczą w transporcie tlenu przez hemoglobinę i w procesach fagocytozy. Reaktywne formy tlenu powstające w nadmiarze są czynnikiem uszkadzającym. Łatwo reagują z cząsteczkami lipidów, białek i DNA, prowadząc do uszkodzenia błon komórkowych oraz aktywacji/inaktywacji enzymów. Skutkami działania RFT mogą być mutacje, dysfunkcje metaboliczne i starzenie się komórek, co prowadzi do rozwoju procesów zapalnych, nowotworów i zaburzenia funkcjonowania narządów (2–5).

Do czynników zewnętrznych powodujących powstanie RFT w organizmie należą m.in. dym tytoniowy, zanieczyszczenia przemysłowe, substancje dodawane do żywności, niektóre leki, promieniowanie jonizujące i elektromagnetyczne.

W obronie przed reaktywnymi formami tlenu organizm wykorzystuje systemy antyoksydacyjne. Pierwszą linią obrony stanowią związki organiczne zawierające jony metali, takie jak ferrytyna, transferyna i ceruloplazmina. Zapobiegają one powstawaniu wolnych rodników tlenowych. Drugą linią obrony są antyoksydanty drobnocząsteczkowe, np. α -tokoferol, witamina C, glutation i enzymy antyoksydacyjne – dysmutaza ponadtlenkowa (superoxide dismutase – SOD), peroksydaza glutationowa (glutathione peroxidase – GPx) i katalaza. Powodują one inaktywację wolnych rodników. Trzecią linią obrony są systemy naprawcze cząsteczek uszkodzonych przez wolne rodniki tlenowe (6–8).

Glutation jest trójpeptydem zbudowanym z reszt aminokwasowych kwasu glutaminowego, cysteiny i glicyny. Występuje powszechnie w komórkach prokariotycznych i eukariotycznych. Jako antyoksydant związek ten bierze udział w redukcji nadtlenu wodoru i nadtlenków organicznych oraz innych reaktywnych form tlenu. W wyniku tego procesu powstaje disulfid glutationu (oxidized glutathione – GSSG), który jest redukowany przez dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate – NADPH) przy udziale enzymu reduktazy glutationowej (9,10). Ponadto bierze on udział w regeneracji innych antyoksydantów (witaminy C i E) i w chelataowaniu niebezpiecznych jonów metali (9–12) oraz utrzymuje prawidłowy stan redoks w komórce. Ważną funkcją glutationu jest utrzymanie grup tiolowych białek w stanie zredukowanym, co zapewnia im aktywność funkcjonalną (13).

Pole magnetyczne niskiej częstotliwości (30–300 Hz) stosowane jest powszechnie w terapii fizykalnej jako uzupełnienie leczenia farmakologicznego i chirurgicznego. Jest wykorzystywane m.in. w leczeniu stanów zapalnych, ułatwia gojenie się ran, rozluźnia napięte mięśnie szkieletowe oraz ma wpływ na układ immunologiczny (14). Doniesienia naukowe wskazują jednak, że narażenie na pole magnetyczne niskiej częstotliwości (extremely low frequency magnetic field – ELF-MF) może powodować wzrost wytwarzania reaktywnych form tlenu (reactive oxygen species – ROS) i rozwój stresu oksydacyjnego w różnych narządach (15–17).

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu pola magnetycznego niskiej częstotliwości, stosowanego w magnetoterapii, na zawartość glutationu całkowitego, utlenionego i zredukowanego oraz stanu redoks w komórce mięśnia poprzecznie prążkowanego w zależności od czasu działania pola.

MATERIAŁ I METODY

Doświadczenia przeprowadzono na szczurach rasy Sprague-Dawely w wieku 3–4 miesięcy, wyhodowanych w zwierzętarni Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Medycznego w Łodzi. Zwierzęta przebywały w warunkach standardowych, tj. przez 14 godzin w oświetleniu

sztucznym i 10 godzin w ciemności, w temperaturze pokojowej. Szczury przebywały w typowych klatkach po 5 sztuk, karmione były paszą granulowaną dla gryzoni Murigran i wodą *ad libidum*. Przed doświadczeniem zwierzęta były aklimatyzowane przez 1 tydzień.

Zwierzęta losowo podzielono na 3 grupy badawcze:

- I grupa (N = 7) – kontrolna, zwierzęta niepoddane działaniu pola magnetycznego niskiej częstotliwości, przebywające w takich samych warunkach jak grupy zwierząt badanych,
- II grupa (N = 7) – zwierzęta poddawane działaniu pola magnetycznego o parametrach: częstotliwość – 40 Hz, indukcja – 7 mT, czas ekspozycji – 30 min/dzień przez 2 tygodnie,
- III grupa (N = 7) – zwierzęta poddawane działaniu pola magnetycznego o parametrach: częstotliwość – 40 Hz, indukcja – 7 mT, czas ekspozycji – 60 min/dzień przez 2 tygodnie.

Zwierzęta poddawane były działaniu pola magnetycznego zawsze o tej samej porze dnia, tj. w godzinach 7:00–9:00, z zachowaniem stałej kolejności ekspozycji. Podczas badania umieszczane były po 3 sztuki w plastikowych pojemnikach, które nie ograniczały poruszania się, we wnętrzu typowego aplikatora będącego elementem zestawu do magnetoterapii. Pole magne-

tyczne jednorodne generowane było przez aparat typu Magnetronic MF-10 (prod. Elektronika i Elektromedycyna, Otwock) (fot. 1). Umożliwił on ustawienie parametrów pola magnetycznego – użyte parametry są najczęściej stosowane w magnetoterapii: $f = 40$ Hz, indukcja – 7 mT, czas ekspozycji – 30 min i 60 min (18,19). Po ostatniej ekspozycji zwierzęta były uśmiercane pentobarbitem (100 mg/kg m.c.).

Fragment tkanki mięśnia szkieletowego pobierano z uda natychmiast po uśmierceniu szczura, przepłukiwano zimną solą fizjologiczną w celu usunięcia nadmiaru krwi, a następnie szybko suszono na bibule i zamrażano w -80°C do czasu oznaczania stężenia glutationu. Badania przeprowadzono za zgodą Lokalnej Komisji Etycznej do Spraw Doświadczeń na Zwierzętach w Łodzi (decyzja nr 40/LB368/2007).

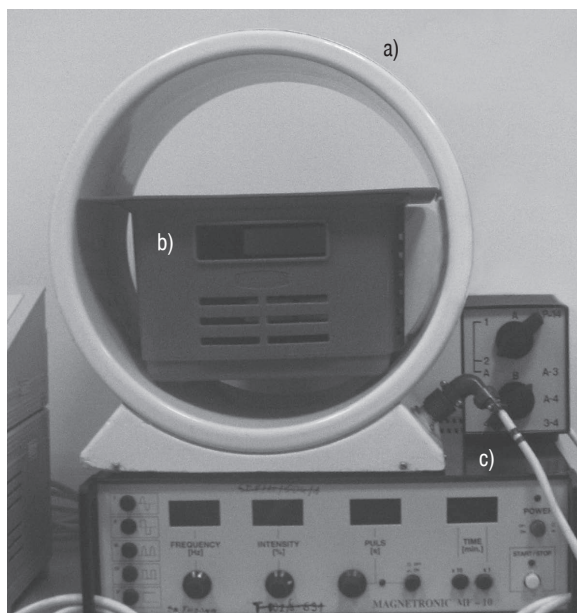
Analizę statystyczną wykonano z wykorzystaniem programu ANOVA. Obejmowała ona analizę podstawowych statystyk opisowych, testy jednorodności wariancji oraz test t-Studenta dla prób niezależnych.

Oznaczenie stężenia glutationu całkowitego

Wyizolowany mięsień poprzecznie przątkowany pościęto na skrawki (50 mg każdy), które homogenizowano w szklanych homogenizatorach w 0,5 ml 5-procentowego kwasu sulfosalicylowego (5-sulfosalicylic acid – 5-SSA). Homogenizację przeprowadzono w temperaturze 4°C , następnie homogenat odwirowano (z prędkością 10 tys.xg, w temp. 4°C przez 10 min). Zebrany supernatant podzielono na porcje – po 5 μl do oznaczenia glutationu całkowitego i po 100 μl do oznaczenia glutationu utlenionego – które do tego czasu przechowywano w temperaturze -76°C .

W celu oznaczenia glutationu całkowitego przygotowano mieszaninę reakcyjną w plastikowej kuwecie, składającą się z 700 μl NADPH, 100 μl kwasu 2,2-ditio-bis-nitrobenzoesowego (2,2-dithio-bis-nitrobenzoic acid – DTNB), 150 μl wody dejonizowanej i 50 μl supernatantu. Po 5 min inkubacji w temperaturze 37°C dodano 20 μl reduktazy glutationu (glutathione reductase – GR). Przyrost absorpcji próbki mierzono spektrofotometrycznie aparatem Ultraspec III (prod. Pharmacia LK, Wielka Brytania) przy długości fali 412 nm przez 5 min.

Stężenie glutationu całkowitego oceniano na podstawie krzywej wzorcowej, wykonanej dla wzrastających stężeń glutationu zredukowanego (wyrażonych w μM) – 500; 250; 125; 62,5; 31,25 i 15,6 – według uzyskanego równania regresji:



a) aplikator pola magnetycznego / magnetic field applicator
 b) plastikowy pojemnik na zwierzęta / plastic container for animals
 c) aparat wytwarzający pole magnetyczne niskiej częstotliwości Magnetronic MF-10 / device generating low frequency magnetic field, Magnetronic MF-10

Fot. 1. Zestaw do wykonania doświadczenia
Photo 1. Set of magnetotherapy

$$y = 54,801(x-x_0)+3,6562; R^2 = 0,9481 \quad [1]$$

gdzie:

x – przyrost absorpcji badanej próbki przy $\lambda = 412$ nm, wyrażony w jednostkach arbitralnych,

x_0 – natężenie emisji próbki kontrolnej przy $\lambda = 412$ nm, wyrażone w jednostkach arbitralnych,

y – stężenie glutationu całkowitego, wyrażone w $\mu\text{mol/l}$.

Próbki analizowano podwójnie.

Oznaczenie glutationu utlenionego

Skrawki mięśnia poprzecznie prążkowanego (50 mg każdy) homogenizowano w szklanym homogenizatorze w 0,5 ml 5-procentowego 5-SSA, utrzymując przez cały czas homogenizacji temperaturę 4°C . Homogenat odwirowano z prędkością 10 tys. obr./min w temperaturze 4°C przez 10 min i podzielono na porcje o wadze 100 μl . Do czasu oznaczania przechowywano je w temperaturze -76°C . Przed oznaczeniem homogenat rozmrożono i zobojętniono do $\text{pH} = 6-7$, używając 1 M chlorowodorotlenku trietanolaminy (chlorhydrol triethanolamine – TEA), a następnie dodano 2 μl 2-vinylopirydyny w celu zablokowania endogennego GSH.

Próbkę inkubowano 60 min w temperaturze pokojowej. W plastikowej kuwecie przygotowano mieszaninę reakcyjną zawierającą 700 μl NADPH, 100 μl DTNB, 150 μl wody dejonizowanej i 50 μl supernatantu. Zawartość kuwety inkubowano przez 5 min w temperaturze $+37^\circ\text{C}$, następnie dodano 20 μl reduktazy glutationu (GR). Przyrost absorpcji próbki mierzono spektrofotometrycznie aparatem Ultraspec III (prod. Pharmacia LKB, Wielka Brytania) przy długości fali 412 nm przez 5 min.

Stężenie glutationu utlenionego oceniano na podstawie krzywej wzorcowej przygotowanej dla wzrastających stężeń glutationu utlenionego (wyrażonych w μM) – 60; 30; 15; 7,5; 3,75 i 1,875 – według równania regresji:

$$y = 7,493(x-x_0)+0,5437; R^2 = 0,829 \quad [2]$$

gdzie:

x – przyrost absorpcji badanej próbki przy $\lambda = 412$ nm, wyrażony w jednostkach arbitralnych,

x_0 – natężenie emisji próbki kontrolnej przy $\lambda = 412$ nm, wyrażone w jednostkach arbitralnych,

y – stężenie glutationu utlenionego, wyrażone w $\mu\text{mol/l}$.

Próbki analizowano podwójnie.

Oznaczenie stężenia glutationu zredukowanego

Stężenie glutationu zredukowanego obliczono na podstawie różnicy wartości glutationu całkowitego i glutationu utlenionego:

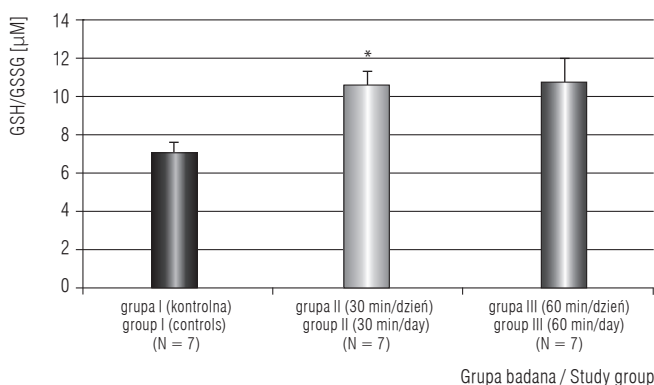
$$\text{GSH} = t\text{GSH} - \text{GSSG} \quad [3]$$

Określenie potencjału redukcyjno-oksydacyjnego komórki

Potencjał redukcyjno-oksydacyjny komórki określono na podstawie stosunku wartości glutationu zredukowanego do utlenionego (GSH/GSSG).

WYNIKI

Stężenie glutationu całkowitego, utlenionego i zredukowanego przedstawiono w tabeli 1. i na rycinie 1. Ekspozycja szczurów przez 2 tygodnie na pole magnetyczne o parametrach 40 Hz i 7 mT przez 30 min/dzień i 60 min/dzień powodowało istotny wzrost stężenia glutationu całkowitego w mięśniach poprzecznie prążkowanym w porównaniu z wynikami otrzymanymi dla grupy kontrolnej ($p < 0,001$). Nie zaobserwowano różnicy istotnej statystycznie w zawartości glutationu całkowitego po ekspozycji zwierząt na ELF-MF przez 30 min/dzień i 60 min/dzień. Stężenie glutationu utlenionego po 30 min ekspozycji na ELF-MF było istotnie większe w porównaniu z wynikami w grupie kontrolnej ($p < 0,01$).



GSH/GSSG – stosunek glutationu zredukowanego do glutationu utlenionego / reduced glutathione vs. oxidized glutathione ratio.

* $p < 0,05$ vs grupa kontrolna / vs. controls.

Ryc. 1. Potencjał redoks układu GSH/GSSG u szczurów z grupy kontrolnej oraz grup przez 2 tygodnie poddanych działaniu pola magnetycznego o wartości 40 Hz i 7 mT przez 30 min/dzień i 60 min/dzień

Fig. 1. The redox potential of the GSH/GSSG in the control rats and after ELF-MF exposure to 40 Hz, 7 mT, 30 min/day or 60 min/day for 2 weeks

Tabela 1. Zmiany metabolizmu glutationu w mięśniu szkieletowym u szczurów z grupy kontrolnej i w grupach poddawanych przez 2 tygodnie działaniu ELF-MF o wartości 40 Hz i 7 mT przez 30 min/dzień i 60 min/dzień
Table 1. Changes in skeletal muscle glutathione metabolism in the control rats without ELF-MF and after ELF-MF exposure to 40 Hz, 7 mT, 30 min/day or 60 min/day for 2 weeks

Parametr Parameter	Grupa I (kontrolna) Group I (control) (N = 7) (M±SE) [μM]	Grupa badana Study group (M±SE) [μM]	
		grupa II (30 min/dzień) group II (30 min/day) (N = 7)	grupa III (60 min/dzień) group II (60 min/day) (N = 7)
tGSH	7,54±0,52	13,16±0,42*	11,78±0,67*
GSSG	0,81±0,01	1,19±0,07**	1,01±0,06***
GSH red	6,73±0,51	12,4±0,44*	10,77±0,72**

tGSH – glutation całkowity / total glutathione, GSSG – glutation utleniony / oxidized glutathione, GSH – glutation zredukowany / reduced glutathione.

* p < 0,001 vs grupa kontrolna / vs. controls.

** p < 0,01 vs grupa kontrolna / vs. controls.

*** p < 0,02 vs grupa kontrolna / vs. controls.

Stężenie glutationu zredukowanego po zastosowaniu pola magnetycznego 30 min/dzień lub 60 min/dzień było istotnie większe w porównaniu z wynikami w grupie kontrolnej (p < 0,001, p < 0,01, odpowiednio). Zaobserwowano statystycznie istotny wpływ pola magnetycznego na wzrost potencjału redoks układu GSH/GSSG w odniesieniu do grupy kontrolnej (p < 0,05).

OMÓWIENIE

W niniejszym badaniu wykazano istotny wzrost stężenia glutationu całkowitego i zredukowanego w mięśniu poprzecznie prążkowanym po ekspozycji zwierząt przez 2 tygodnie na pole magnetyczne o parametrach 40 Hz i 7 mT przez 30 min/dzień. Wydłużenie czasu ekspozycji do 60 min/dzień przez 2 tygodnie powodowało dalszy wzrost stężenia glutationu. Uzyskane wyniki są zgodne z wcześniejszymi badaniami autorów niniejszej publikacji – w nich także ekspozycja na pole magnetyczne powodowała wzrost stężenia wolnych grup sulfhydrylowych (–SH) w tkance mięśnia poprzecznie prążkowanego (20).

Cechą charakterystyczną glutationu jest obecność grupy –SH, od której zależy biologiczna funkcja glutationu. Wykazano, że grupy –SH należą do najbardziej reaktywnych grup chemicznych występujących w komórce (12,21). Wzrost stężenia glutationu całkowitego i zredukowanego w niniejszym badaniu wskazuje na mechanizm adaptacyjny do działania pola magnetycznego. Glutation stanowi pierwszą linię obrony prze-

ciwko wzrostowi RFT, ma zdolność usuwania wolnych rodników i jest kofaktorem w procesach metabolicznych, które mają udział w detoksykacji RFT (12).

Nieznaczny stres oksydacyjny może powodować zwiększenie syntezy glutationu i jego stężenia. Z kolei silny oksydacyjny stres może hamować stężenie glutationu z powodu utraty adaptacyjnego mechanizmu i utlenienia GSH do GSSG. Wzrost stężenia GSH wskazuje na wzrost obrony antyoksydacyjnej i sugeruje oksydacyjny stres w komórkach mięśni poprzecznie prążkowanych. Stosunek GSH do GSSG jest miarą stanu oksydacyjno-redukcyjnego i spada podczas stresu oksydacyjnego.

Rolą GSH i innych wewnątrzkomórkowych antyoksydantów jest zmniejszenie stresu oksydacyjnego. Także Glinka i Sieroń (22) obserwowali wzrost enzymatycznego układu antyoksydacyjnego w czasie działania pola ELF-MF (40 Hz, 10 mT). Podobnie Morabito i wsp. (23) wykazali wzrost aktywności katalazy i peroksydazy glutationowej w hodowli komórkowej po zastosowaniu ELF-MF o wartości 50 Hz, intensywności – 1 μT – 1 mT i czasie ekspozycji – 30 min. Katalaza i peroksydaza glutationowa oraz dysmutaza ponadtlenkowa przeciwdziała także aktywacji czynnika jądrowego NF-kappaB, który jest aktywowany w odpowiedzi na stres oksydacyjny (24).

Badania dotyczące wpływu pola magnetycznego na komórki i tkanki organizmu nie są jednoznaczne. Większość autorów uważa, ELF-MF zwiększa wytwarzanie reaktywnych form tlenu i proces lipido-

wej peroksydacji (20–28). W części prac wykazano, że ELF-MF nie ma wpływu na wytwarzanie reaktywnych form tlenu w różnych narządach zwierząt doświadczalnych (15,25,29). Oddziaływanie pola magnetycznego na wytwarzanie reaktywnych form tlenu zależy też od czasu ekspozycji na to pole oraz jego natężenia i częstotliwości (29), a także od stanu, w jakim znajdują się komórki. Bułdak i wsp. (30) wykazali np., że komórki inkubowane z cisplatyną i poddane działaniu ELF-MF o parametrach 50 Hz i 1 mT przez 24 godz. lub 72 godz. zmniejszyły wytwarzanie ROS i miały mniej uszkodzeń DNA w porównaniu z komórkami, które były poddane tylko działaniu cisplatyny.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki sugerują, że GSH odgrywa ważną rolę w ochronie tkanek przed polem magnetycznym. Ekspozycja na pole magnetyczne stosowane w magnetoterapii prowadzi do rozwoju mechanizmów adaptacyjnych, których celem jest utrzymanie równowagi oksydacyjno-redukcyjnej organizmu, i zależy od czasu ekspozycji.

PIŚMIENNICTWO

- Bartosz G.: Druga twarz tlenu. Wolne rodniki w przyrodzie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009
- Piowar A., Knapik-Kordecka M., Wyrwas M.: Stres oksydacyjny a dysfunkcja śródbłonna w cukrzycy typu 2. *Pol. Merk. Lek.* 2008;25(146):120–123
- Zabłocka A., Janusz M.: Dwa oblicza wolnych rodników tlenowych. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2008;62:118–124
- Barbieri E., Sestili P.: Reactive oxygen species in skeletal muscle signaling. *J. Signal. Transduct.* 2012;2012:982794, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/982794>
- Csányi G., Miller Jr. F.J.: Oxidative stress in cardiovascular disease. *Int. J. Mol. Sci.* 2014;15(4):6002–6008, <http://dx.doi.org/10.3390/ijms15046002>
- Droge W.: Free radicals in the physiological control of cell function. *Physiol. Rev.* 2002;82(1):47–95
- Valko M., Leibfritz D., Moncol J., Cronin M.T.D., Mazur M., Telser J.: Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *Int. J. Biochem. Cell. Biol.* 2007;39(1):44–84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocel.2006.07.001>
- Jomova K., Vondrakova D., Lawson M., Valko M.: Metals, oxidative stress and neurodegenerative disorders. *Mol. Cell. Biochem.* 2010;345(1–2):91–104, <http://dx.doi.org/10.1007/s11010-010-0563-x>
- Pastore A., Federici G., Bertini E., Piemonte F.: Analysis of glutathione: Implication in redox and detoxification. *Clin. Chim. Acta* 2003;333(1):19–39, [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-8981\(03\)00200-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-8981(03)00200-6)
- Janowiak B.E., Hayward M.A., Peterson F.C., Volkman B.F., Griffith O.W.: Gamma-glutamylcysteine synthetase-glutathione synthetase: Domain structure and identification of residues important in substrate and glutathione binding. *Biochemistry* 2006;45(35):10461–10473
- Winiarska K.: Glutathione: Niezwykłe funkcje pospolitego peptydu. *Postępy Biochem.* 2000;46:318–326
- Bilska A., Kryczyk A., Włodek L.: Różne oblicza biologicznej roli glutationu. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2007;61:438–453
- Jones D.P., Mody Jr. V.C., Carlson J.L., Lynn M.J., Sternberg Jr. P.: Redox analysis of human plasma allows separation of pro-oxidant events of aging from decline in antioxidant defenses. *Free Radic. Biol. Med.* 2002;33(9):1290–1300
- Sieroń A., Cieslar G., Kawczyk-Krupa A., Biniszkiwicz T., Bilska-Urban A., Adamek M.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. *α-Medica Press, Bielsko-Biała* 2002
- Martínez-Sámano J., Torres-Durán P.V., Juárez-Oropeza M.A., Elías-Viñas D., Verdugo-Díaz L.: Effects of acute electromagnetic field exposure and movement restraint on antioxidant system in liver, heart, kidney and plasma of Wistar rats: A preliminary report. *Int. J. Radiat. Biol.* 2010;86(12):1088–1094, <http://dx.doi.org/10.3109/09553002.2010.501841>
- Luukkonen J., Liimatainen A., Juutilainen J., Naarala J.: Induction of genomic instability, oxidative processes, and mitochondrial activity by 50 Hz magnetic fields in human SH-SY5Y neuroblastoma cells. *Mutat. Res.* 2014;760:33–41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2013.12.002>
- Duan Y., Wang Z., Zhang H., He Y., Lu R., Zhang R. i wsp.: The preventive effect of lotus seedpod procyanidins on cognitive impairment and oxidative damage induced by extremely low frequency electromagnetic field exposure. *Food Funct.* 2013;4(8):1252–1262, <http://dx.doi.org/10.1039/c3fo60116a>
- Pasek J., Pasek T., Herba E., Misiak A., Sieroń-Stołtny K., Sieroń A.: Magnetotherapy in the treatment of viral conjunctivitis and keratitis. *Wiad. Lek.* 2008;61:288–290
- Pasek J., Pasek T., Sieroń A.: The efficiency of magnetic fields in the treatment of leukocytoclastic vasculitis: A case report. *Acta Angiol.* 2010;16(2):93–98
- Ciejka E., Kleniewska P., Skibska B., Goraca A.: Effects of extremely low frequency magnetic field on oxidative balance in brain of rats. *J. Physiol. Pharmacol.* 2011;62(6):657–661

21. Gilbert H.F.: Molecular and cellular aspects of thiol-disulfide exchange. *Adv. Enzymol. Relat. Areas Mol. Biol.* 1990;63:69–172
22. Glinka M., Birkner E., Sieroń A., Cieślak G.: Influence of extremely low-frequency magnetic field on the activity of antioxidant enzymes during skin wound healing in rats. *Electromagn. Biol. Med.* 2013;32(4):463–470, <http://dx.doi.org/10.3109/15368378.2012.743906>
23. Morabito C., Rovetta F., Bizzarri M., Mazzoleni G., Fano G., Mariggio M.A.: Modulation of redox status and calcium handling by extremely low frequency electromagnetic fields in C2C12 muscle cells: A real-time, single-cell approach. *Free Radic. Biol. Med.* 2010;48(4):579–589, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.freeradbiomed.2009.12.005>
24. Schreck R., Albermann K., Baeuerle P.A.: Nuclear factor kappaB: An oxidative stress-responsive transcription factor of eukaryotic cells (a review). *Free Radic. Res. Commun.* 1992;17(4):221–237, <http://dx.doi.org/10.3109/10715769209079515>
25. Falone S., Grossi M.R., Cinque B., D'Angelo B., Tetamanti E., Cimini A. i wsp.: Fifty hertz extremely low-frequency electromagnetic field causes changes in redox and differentiative status in neuroblastoma cells. *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 2007;39(11):2093–2106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocel.2007.06.001>
26. Selaković V., Rauš Balind S., Radenović L., Prolić Z., Janać B.: Age-dependent effects of ELF-MF on oxidative stress in the brain of Mongolian Gerbils. *Cell Biochem. Biophys.* 2013;66(3):513–521, <http://dx.doi.org/10.1007/s12013-012-9498-z>
27. Bediz C.S., Baltacı A.K., Mogulkoc R., Öztekin E.: Zinc supplementation ameliorates electromagnetic field-induced lipid peroxidation in the rat brain. *Tohoku J. Exp. Med.* 2006;208(2):133–140, <http://dx.doi.org/10.1620/tjem.208.133>
28. Balind S.R., Selaković V., Radenović L., Prolić Z., Janać B.: Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) reduces oxidative stress in the brain of gerbils submitted to global cerebral ischemia. *PLoS ONE* 2014;9(2):e988921, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0088921>
29. Hong M.N., Han N.K., Lee H.C., Ko Y.K., Chi S.G., Lee Y.S. i wsp.: Extremely low frequency magnetic fields do not elicit oxidative stress in MCF10A cells. *J. Radiat. Res.* 2012;53(1):79–86, <http://dx.doi.org/10.1269/jrr.11049>
30. Bułdak R.J., Polaniak R., Bułdak L., Żwirska-Korczała K., Skonieczna M., Monsiol A. i wsp.: Short-term exposure to 50 Hz ELF-EMF alters the cisplatin-induced oxidative response in AT478 murine squamous cell carcinoma cells. *Bioelectromagnetics* 2012;33(8):641–651, <http://dx.doi.org/10.1002/bem.21732>