

Elżbieta Ciejka^{1,2}

Beata Skibska³

Anna Gorąca^{4,5}

WPŁYW POLA MAGNETYCZNEGO NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI STOSOWANEGO W MAGNETOTERAPII NA ZAWARTOŚĆ INTERLEUKINY 6 (IL-6) W SERCU I MÓZGU SZCZURA

INFLUENCE OF LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELD USED IN MAGNETOTHERAPY ON INTERLEUKIN 6 (IL-6) CONTENTS IN RAT HEART AND BRAIN

¹ Wyższa Szkoła Biznesu i Nauk o Zdrowiu w Łodzi / The Academy of Business Administration and Health Sciences, Łódź, Poland

² Wojewódzki Zespół Zakładów Opieki Zdrowotnej Centrum Leczenia Chorób Płuc i Rehabilitacji / Provincial Complex of Health Care Units, Center of Lung Diseases and Rehabilitation, Łódź, Poland

Oddział Rehabilitacji Neurologicznej / Department of Neurological Rehabilitation

³ Uniwersytet Medyczny w Łodzi / Medical University of Lodz, Łódź, Poland

Zakład Farmacji Aptecznej, Katedra Farmacji Stosowanej / Department of Pharmacy, Department of Applied Pharmacy

⁴ Uniwersytet Medyczny w Łodzi / Medical University of Lodz, Łódź, Poland

Zakład Fizjologii Krążenia, Katedra Fizjologii Doświadczalnej i Klinicznej / Department of Cardiovascular Physiology, Chair of Experimental and Clinical Physiology

⁵ Wyższa Szkoła Kosmetyki i Nauk o Zdrowiu / College of Cosmetology and Health Sciences, Łódź, Poland

STRESZCZENIE

Wstęp: Na działanie pól magnetycznych narażona jest coraz większa populacja ludzka. Wynika to zarówno z postępu technicznego i gospodarczego, jak i rozwoju nauk medycznych. Dlatego ważne jest dokładne poznanie i usystematyzowanie wiedzy w zakresie mechanizmów oddziaływania pola magnetycznego na organizmy żywe, dotyczy to zdrowia osób ekspozowanych, narażonych na ich działanie. Celem pracy było zbadanie wpływu pola magnetycznego skrajnie niskiej częstotliwości (extremely low frequency magnetic field – ELFMF) na stężenie interleukiny 6 (IL-6) w sercu i mózgu szczura. **Materiał i metody:** Materiał badawczy stanowiły szczury (Sprague-Dawley) podzielone na 3 grupy badawcze: I grupa – kontrolna, bez działania pola magnetycznego; II grupa – poddana działaniu bipolarnego, prostokątnego pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i indukcji międzyszczytowej 7 mT, czas ekspozycji – 30 min/dzień przez 2 tygodnie; III grupa – poddana działaniu bipolarnego, prostokątnego pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i indukcji międzyszczytowej 7 mT, czas ekspozycji – 60 min/dzień przez 2 tygodnie. U zwierząt oznaczono stężenia IL-6 po zakończeniu ekspozycji na pole magnetyczne. **Wyniki:** Ekspozycja szczurów w ELFMF o parametrach: częstotliwość 40 Hz, indukcja międzyszczytowa 7 mT, przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie spowodowała istotny statystycznie wzrost stężenia IL-6 w sercach w porównaniu z grupą kontrolną ($p < 0,05$) i nieistotnie statystycznie obniżenie stężeń IL-6 w mózгах. Pole magnetyczne stosowane przez 60 min powodowało nieistotny statystycznie wzrost stężeń IL-6 w sercach w porównaniu z grupą kontrolną i istotne statystycznie obniżenie stężeń IL-6 w mózгах ($p < 0,05$). **Wnioski:** Wpływ pola magnetycznego na stan zapalny w organizmie jest różny w zależności od czasu oddziaływania pola magnetycznego oraz tkanek czy komórek, na które działa. Med. Pr. 2017;68(4):517–523

Słowa kluczowe: szczury, mózg, interleukina, pole magnetyczne, terapia polem magnetycznym, serce

ABSTRACT

Background: The human population is exposed ever more frequently to magnetic fields (MF). This is due to both technological progress and development of the economy as well as to advances made in medical science. That is why the thorough understanding and systematized knowledge about mechanisms by which MF exerts its effects on living organisms play such an important role. In this context the health of MF-exposed people is the subject of particular concern. The aim of the study was to evaluate the effect of extremely low frequency magnetic field (ELFMF) used in magnetotherapy on the concentration of interleukin 6 (IL-6) in rat heart and brain. **Material and Methods:** The male rats were randomly divided into 3 experimental groups: group I – control, without contact with magnetic field; group II – exposed to bipolar, rectangular magnetic field 40 Hz, induction “peak-to-peak” 7 mT 30 min/day for 2 weeks; and group III – exposed to bipolar, rectangular magnetic field 40 Hz, 7 mT 60 min/day for 2 weeks. Concentration of IL-6 in the heart and brain of animals was measured after MF exposure. **Results:** Exposure to ELFMF: 40 Hz, induction “peak-to-peak” 7 mT 30 min/day for 2 weeks caused a significant IL-6 increase in rat hearts compared to the control group ($p < 0.05$) and a non-significant IL-6 decrease in rat brain. The magnetic field applied for 60 min resulted in non-significant IL-6 increase in rat

hearts compared to the control group and significant IL-6 decrease in rat brain ($p < 0.05$). **Conclusions:** The influence of magnetic field on inflammation in the body varies depending on the MF parameters and the affected tissues or cells. *Med Pr* 2017;68(4):517–523

Key words: rats, brain, interleukin, magnetic field, magnetic field therapy, heart

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Elżbieta Ciejka, Wojewódzki Zespół Zakładów Opieki Zdrowotnej Centrum Leczenia Chorób Płuc i Rehabilitacji, Oddział Rehabilitacji Neurologicznej, ul. Okólna 181, 91-520 Łódź, e-mail: Elzbieta.Ciejka@gmail.com
Nadesłano: 13 sierpnia 2015, zatwierdzono: 8 listopada 2016

WSTĘP

Wszystkie żywe istoty podlegają wpływowi pola magnetycznego – prawidłowy przebieg procesów fizjologicznych uwarunkowany jest obecnością pola geomagnetycznego, a zachodzące w organizmie człowieka procesy wynikają z działania sił elektromagnetycznych [1]. Dzięki postępowi techniki w ostatnich latach nastąpił rozwój wiedzy o wpływie pól magnetycznych, zwłaszcza wolnozmiennych, na procesy zachodzące w organizmach żywych. Liczne badania stworzyły podstawy do stosowania pól magnetycznych w medycynie.

Obecnie używane są 2 metody terapeutyczne wykorzystujące pole magnetyczne – magnetoterapia z polem magnetycznym o indukcji rzędu 1–30 mT i częstotliwości do 100 Hz (określana jako terapia impulsowym polem magnetycznym niskiej częstotliwości), oraz, nieco młodsza i coraz częściej stosowana, magnetostymulacja o indukcji pola 1 pT–100 μ T oraz częstotliwości od kilku do 3000 Hz [2].

Magnetoterapia jest powszechną formą terapii. Należy ona do tzw. naturalnych metod leczniczych i jest wykorzystywana jako uzupełnienie leczenia farmakologicznego i chirurgicznego wielu schorzeń narządu ruchu: stanów pourazowych, zmian zwyrodnieniowych stawów obwodowych i kręgosłupa, zespołów bólowych, a także w terapii trudno gojących się ran, blizn, owrzodzeń oraz w chorobach neurologicznych i chorobach układu krążenia [2–7].

Odczyn zapalny jest swoistą, ukierunkowaną odpowiedzią biochemiczną, hematologiczną i immunologiczną organizmu na pojawiający się czynnik stresogenny, np. mechaniczne uszkodzenie tkanki. Reakcja zapalna z kolei jest odpowiedzią tkanek i narządów organizmu na wiele czynników uszkodzających. Rodzaj i zakres reakcji zapalnej zależą od siły czynnika uszkodzającego oraz czasu jego oddziaływania, dając obraz odczynu ostrego lub przewlekłego [8]. Czynniki wywołujące zapalenie mogą być zewnątrz- lub wewnątrz-pochodne: fizyczne (np. pole magnetyczne), chemiczne i biologiczne.

Podstawowymi komórkami biorącymi udział w zapaleniu są krążące komórki krwi: granulocyty, monocyty, płytki krwi, limfocyty T i B oraz ich subpopulacje. Jednymi z pierwszych substancji pojawiających się w wyniku uszkodzenia tkanki są cytokiny prozapalne, ich wydzielanie może być wywołane bezpośrednio przez czynnik uszkodzający lub przez substancje pochodzące z rozpadających się komórek [9]. Wśród cytokin prozapalnych wymienia się: interleukinę 1 (IL-1), interleukinę 6 (IL-6), interleukinę 8 (IL-8), interleukinę 15 (IL-15), interleukinę 17 (IL-17), interleukinę 18 (IL-18), interleukinę 23 (IL-23) oraz czynnik martwicy nowotworu α (tumour necrosis factor α – TNF- α) [10]. Interleukina 6 (IL-6) wywiera wielokierunkowy wpływ na komórki układu odporności wrodzonej i nabytej. Bierze udział w zapoczątkowaniu i rozwoju ostrej odpowiedzi zapalnej, ułatwia także rozwój odpowiedzi nabytej. Interleukina 6 jest endogennym pirogenem, reguluje metabolizm żelaza, bierze udział w procesach metabolicznych oraz sprzyja rozwojowi autoreaktywnej odpowiedzi immunologicznej. Dlatego też interleukinie 6 przypisuje się istotną rolę w patogenezie chorób zapalnych i autoimmunizacyjnych [11].

Ponieważ IL-6 jest ważnym regulatorem reakcji ostrej fazy, jej działanie prozapalne wpływa najprawdopodobniej niekorzystnie na układ krążenia [12–14], jak również występuje w przypadku zmian chorobowych w obrębie mózgu [15,16].

Doniesienia literaturowe i sposób oddziaływania pól magnetycznych na zdrowie człowieka nadal pozostają nie w pełni wyjaśnione [17], dlatego wskazane wydaje się prowadzenie badań w tym zakresie.

Celem pracy była ocena wpływu pola magnetycznego niskiej częstotliwości, pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i indukcji międzyszczytowej 7 mT o przebiegu prostokątnym w czasie kolejno 30 min i 60 min, emitowanego przez aparat Magnetronic MF-10 (prod. Elektronika i Elektromedycyna, Polska), przez 2 tygodnie, na stężenie interleukiny 6 w sercu i mózgu szczura.

MATERIAŁ I METODY

Doświadczenia przeprowadzono na szczurach rasy Sprague-Dawley (N = 15) w wieku 3–4 miesięcy, wyhodowanych w zwierzętarni Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Medycznego w Łodzi. Zwierzęta przebywały w warunkach standardowych, tj. przez 14 godz. w oświetleniu sztucznym i 10 godz. w ciemności, w temperaturze pokojowej. Szczury przebywały w typowych klatkach po 5 sztuk, były karmione paszą granulowaną dla gryzoni Murigran i wodą *ad libidum*. Przed doświadczeniem zwierzęta aklimatyzowano przez 1 tydzień.

Zwierzęta losowo podzielono na 3 grupy badawcze:

- I grupa (N = 5) – kontrolna, zwierzęta niepoddane działaniu pola magnetycznego niskiej częstotliwości, przebywające w tych samych warunkach co grupy zwierząt badanych,
- II grupa (N = 5) – zwierzęta poddawane działaniu bipolarnego, prostokątnego pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i ustawionej indukcji międzyszczytowej 7 mT, czas ekspozycji – 30 min/dzień przez 2 tygodnie,
- III grupa (N = 5) – zwierzęta poddawane działaniu bipolarnego, prostokątnego pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i ustawionej indukcji międzyszczytowej 7 mT, czas ekspozycji – 60 min/dzień przez 2 tygodnie.

Zwierzęta poddawano działaniu pola magnetycznego zawsze o tej samej porze dnia, tj. w godz. 7:00–9:00, z zachowaniem stałej kolejności ekspozycji. Podczas badania umieszczano je w plastikowych pojemnikach, które nie ograniczały poruszania się, we wnętrzu typowego aplikatora stanowiącego element zestawu do magnetoterapii. Źródłem pola magnetycznego był stosowany w magnetoterapii aparat typu Magnetronic MF-10 z aplikatorem AS-315, umożliwiający uzyskanie pola magnetycznego o częstotliwości 40 Hz i indukcji międzyszczytowej 7 mT o przebiegu prostokątnym, w czasie, kolejno, 30 min i 60 min.

Dobór zastosowanych w pracy parametrów: indukcji 7 mT i częstotliwości pola magnetycznego 40 Hz, wynikał z analizy skierowań pacjentów na leczenie magnetoterapią oraz analizy piśmiennictwa, na którego podstawie ustalono, że wartość indukcji 7 mT stanowiła średnią najczęstszych wartości indukcji pola magnetycznego stosowanego w terapii i w badaniach eksperymentalnych, a częstotliwość 40 Hz należy do najczęściej wykorzystywanych w terapii i w badaniach doświadczalnych opisanych w piśmiennictwie. Z kolei dobór czasu ekspozycji 30 min i 60 min wynikał

z analizy wskazań takich wartości oddziaływania pola magnetycznego w przypadkach terapii zespołów porażonych narządu ruchu oraz przeglądu literatury. Ponadto w badaniach eksperymentalnych w większości prac czas ekspozycji na działanie pola magnetycznego był znacznie dłuży lub też bardzo krótki [5,18,19].

Po ostatniej ekspozycji zwierzęta uśmiercano pentobarbitem (100 mg/kg mc.). Fragment tkanki serca i mózgu pobierano natychmiast po uśmierceniu, przepłukiwano zimnym roztworem 0,9% chlorku sodowego (0,9% sodium chloride – NaCl) w celu usunięcia nadmiaru krwi, po czym szybko suszono na bibule i zamrażano w -80°C do czasu oznaczania stężenia interleukiny 6 (IL-6).

Przygotowanie homogenatów tkankowych do oznaczeń

Zamrożone, uprzednio przygotowane skrawki badanych narządów szczurów, o wadze 25–40 mg, przenoszono do homogenizatora szklanego. Homogenizację tkanek prowadzono za pomocą homogenizatorów ręcznych stożkowych z tłuczkiem teflonowym o objętości 3 ml (prod. BIONOVO, Polska). Przed homogenizacją dodawano do każdego skrawka odpowiednią ilość oziębionego roztworu buforu fosforanowego (phosphate buffered saline – PBS) w stosunku 1 ml / 25 mg tkanki. Tkanki kolejno poddawano homogenizacji, w której wyniku otrzymano lizaty złożone z całych komórek. Uzyskany materiał biologiczny przenoszono do probówek Eppendorfa. Procedurę homogenizacji przeprowadzono w odpowiedniej temperaturze, tj. $+4^{\circ}\text{C}$. Następnie w celu degradacji błony komórkowej i uwolnienia białek lizaty poddawano 2 cyklom zamrażania–rozmrzania. Próbkę zamrażano w temperaturze -80°C , a rozmrażano w temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$. Lizaty zostały odwirowane (5 min) przy względnym przyspieszeniu odśrodkowym $5000\times g$. Po odwirowaniu pobierano supernatant i dokonywano właściwych oznaczeń.

Oznaczenia przy pomocy testu sandwich-ELISA

W otrzymanych homogenatach tkankowych oznaczano zawartość IL-6 za pomocą testu immunoenzymosorpcyjnego podwójnego wiązania (sandwich-ELISA – enzyme-linked immunosorbent assay). W analizie użyto zestawu Enzyme-linked Immunosorbent Assay Kit for Interleukin 6 (IL-6) (prod. Cloud-Clone Corp., USA).

Oznaczenia białka całkowitego BCA

Analizę białka całkowitego w badanych homogenatach przeprowadzono za pomocą testu kwasem bicorn-

choninowym (bicinchoninic acid – BCA) Pierce BCA Protein Assay Kit (prod. Thermo SCIENTIFIC, USA). Stężenia IL-6 dla każdej próbki zostały znormalizowane w stosunku do całkowitej ilości białka w lizatach tkankowych (IL-6/BCA – iloraz stężenia IL-6 (pg/ml) i stężenia białka całkowitego BCA (mg/ml)). Następnie uśredniono wartości IL-6/BCA w obrębie każdej badanej grupy.

Analizę statystyczną wykonano z wykorzystaniem programu ANOVA. Obejmowała ona analizę podstawowych statystyk opisowych, testy jednorodności wariancji, testy zgodności z rozkładem normalnym Kołmogorowa-Smirnowa oraz porównań wielokrotnych za pomocą testu *post-hoc* Tukeya.

Badania przeprowadzono za zgodą Lokalnej Komisji Etycznej do Spraw Doświadczeń na Zwierzętach w Łodzi (zgoda nr 40/LB368/2007).

WYNIKI

Wyniki oznaczenia stężeń IL-6 w homogenach serc i mózgow szczurów przedstawiono w tabeli 1.

Analiza statystyczna wykazała, że ekspozycja szczurów w polu magnetycznym niskiej częstotliwości (częstotliwość – 40 Hz, indukcja – 7 mT) przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie powodowała znamienny wzrost stężeń IL-6 w sercach w porównaniu z grupą kontrolną (13,372±5,261 vs 7,821±2,4, $p < 0,05$). Natomiast pole magnetyczne stosowane przez 60 min spowodowało nieistotny statystycznie wzrost stężeń IL-6 w sercach szczurów w porównaniu z grupą kontrolną (9,168±1,59 vs 7,821±2,4), a w porównaniu z grupą poddaną 30-mi-

nutowej ekspozycji – spadek wartości stężenia IL-6 (9,168±1,59 vs 13,372±5,261).

W przypadku badań wpływu pola magnetycznego niskiej częstotliwości na mózg analiza statystyczna wykazała, że ekspozycja szczurów w polu magnetycznym niskiej częstotliwości (częstotliwość – 40 Hz, indukcja – 7 mT) przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie powodowała nieistotny statystycznie spadek stężeń IL-6 w mózгах w porównaniu z grupą kontrolną (53,427±12,724 vs 70,253±22,732). Natomiast pole magnetyczne stosowane przez 60 min powodowało znamienne obniżenie stężeń IL-6 w mózгах szczurów w porównaniu z grupą kontrolną (35,84±5,584 vs 70,253±22,732, $p < 0,05$).

OMÓWIENIE

Powszechnym zagadnieniem podejmowanym przez badaczy są mechanizmy oddziaływania pól magnetycznych na organizmy żywe. W prowadzonych doświadczeniach zajmują się oni oddziaływaniem pól magnetycznych zarówno stałych, jak i zmiennych, skupiając się w głównej mierze na takich wskaźnikach jak indukcja i częstotliwości stosowanego pola. W dotychczasowych doniesieniach nie ma jednak rozważań dotyczących efektów różnego czasu ekspozycji na zmienne pole magnetyczne przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennego wartości indukcji pola magnetycznego i częstotliwości.

Wpływ pola elektromagnetycznego na proces zapalny znajduje się wśród hipotez mających na celu wyjaśnienie leczniczego mechanizmu działania pola magne-

Tabela 1. Znormalizowane stężenie interleukiny 6 (IL-6) w tkance serca i mózgu szczurów narażanych na działanie pola magnetycznego ekstremalnie niskiej częstotliwości

Table 1. Normalised concentration of interleukin 6 (IL-6) in heart and brain tissues of rats exposed to the extremely low frequency magnetic field

Narząd Organ	IL-6/BCA (M±SD)		
	grupa I group I (N = 5)	grupa II group II (N = 5)	grupa III group III (N = 5)
Serce / Heart	7,821±2,400	13,372±5,261*	9,168±1,159
Mózg / Brain	70,253±22,732	53,427±12,724	35,840±5,584*

IL-6/BCA – iloraz stężenia IL-6 (pg/ml) i stężenia białka całkowitego (mg/ml), którego analizę przeprowadzono za pomocą testu kwasem bicinchoninowym (BCA) / IL-6 concentration (pg/ml) and total protein concentration (mg/ml), assayed by bicyclic acid (BCA).

M – mean / średnia, SD – odchylenie standardowe / standard deviation.

I – grupa kontrolna / control group, II – grupa poddana działaniu indukcji międzyszczytowej 7 mT i częstotliwości 40 Hz przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie / group exposed to magnetic field 40 Hz, induction “peak-to-peak” 7 mT 30 min/day for 2 weeks, III – grupa poddana działaniu indukcji międzyszczytowej 7 mT i częstotliwości 40 Hz przez 60 min/dzień przez 2 tygodnie / group exposed to 40 Hz, 7 mT 60 min/day for 2 weeks.

N – liczba szczurów / number of rats.

* $p < 0,05$.

tycznego w różnych jednostkach chorobowych, a liczne badania donoszą o wpływie pól magnetycznych na procesy oksydacyjne zachodzące w komórkach organizmów żywych [20]. Interleukina 6 (IL-6) jest jednym z najważniejszych czynników prozapalnych i może być parametrem odzwierciedlającym rozwój procesów zapalnych.

W niniejszym badaniu wykazano wpływ pola magnetycznego niskiej częstotliwości, stosowanego w magnetoterapii o parametrach: częstotliwość 40 Hz, indukcja międzyszczytowa 7 mT o różnym czasie ekspozycji na stężenie IL-6 w sercach szczurów. W przypadku 30-minutowej ekspozycji widoczny był znaczący wzrost stężenia IL-6 w odniesieniu do grupy kontrolnej. Wydłużenie czasu ekspozycji do 60 min spowodowało nieistotny statystycznie wzrost stężeń IL-6 w stosunku do grupy kontrolnej i nieistotny statystycznie spadek w porównaniu z grupą poddaną 30-minutowej ekspozycji. Wynik ten wskazuje, że w sercach szczurów efekt działania pola magnetycznego jest różny w zależności od czasu ekspozycji.

Doniesienia z literatury w zakresie oddziaływania pola magnetycznego niskiej częstotliwości na organizmy żywe nie są jednoznaczne. W badaniach na zwierzętach – szczurach, które poddano działaniu pola magnetycznego o parametrach: indukcja 100 μ T, częstotliwość 50 Hz, przez 2 godz./dobę przez 3 miesiące, zaobserwowano spadek stężenia prozapalnej interleukiny 12 (IL-12) w surowicy [21]. Kolejne doświadczenie, na którego podstawie można ocenić wpływ pola magnetycznego na stężenie mediatorów zapalnych w surowicy, było prowadzone *in vivo* na myszach. Określano m.in. wpływ pola magnetycznego (50 Hz, 3 mT, 20 godz./dobę, 17 dni) na stężenie cytokin prozapalnych, TNF- α i IL-1 β . W surowicy pobranej z podskórnych naczyń krwionośnych nie stwierdzono żadnych zmian w stężeniach tych mediatorów [22].

Prace dotyczące efektów działania pola magnetycznego na organizm prowadzono również na hodowlach komórkowych. Wyniki badań *in vitro* wskazywały na wzrost czynników prozapalnych pod wpływem pola magnetycznego. Wykazano, że kolonie mysich makrofagów poddawane wpływom pola magnetycznego niskiej częstotliwości (50 Hz, 1 mT) zwiększały produkcję prozapalnej IL-1 β w zależności od czasu ekspozycji: po 45 min wzrost był 1,6-krotny, a po 24 godz. – nawet 12-krotny [23].

W przypadku oceny wpływu pola magnetycznego niskiej częstotliwości na stężenie IL-6 w mózgu szczurów zaobserwowano, że 30-minutowa ekspozycja powoduje nieznaczny spadek stężenia IL-6 w odniesie-

niu do grupy kontrolnej, a wydłużenie czasu ekspozycji do 60 min przyniosło dalsze obniżenie stężeń IL-6 statystycznie istotne w stosunku do grupy kontrolnej i spadek w porównaniu z grupą poddaną 30-minutowej ekspozycji. Wynik ten wskazuje, że w mózgu szczura efekt działania pola magnetycznego jest zależny od czasu ekspozycji.

Rasouli i wsp. [24] w swoich badaniach oznaczyli stężenie prozapalnej interleukiny 1 w mózgu szczurów, u których wywoływano wewnętrzne urazy głowy metodą Marmou. Powstałe uszkodzenia mózgu prowadziły do wzrostu stężenia IL-1, ważnego czynnika prozapalnego, podobnie jak IL-6. Cytokina ta pełni ważną funkcję w odpowiedzi zapalnej na uszkodzenie mózgu, a wzrost jej stężenia jest proporcjonalny do nasilenia uszkodzenia. Badania wykazały, że osłabienie jej działania poprawia efekty behawioralne. W ww. doświadczeniu zaobserwowano 10-krotny spadek stężenia IL-1 pod wpływem pola magnetycznego, co potwierdziło hipotezę przeciwzapalnego działania tego pola w leczeniu chorób ośrodkowego układu nerwowego (OUN) [25].

W kolejnym doświadczeniu inni autorzy zaobserwowali, że pole magnetyczne o częstotliwości 15 Hz i indukcji 18 mT może zmniejszyć odczyn zapalny i łagodzić uszkodzenia mózgu w porównaniu z grupą kontrolną [26]. Pole magnetyczne niskiej częstotliwości przenika przez wszystkie systemy biologiczne organizmów żywych, oddziałuje na strukturę błon komórkowych, procesy transportu jonowego i koncentrację jonów w przestrzeniach komórkowych, które z kolei nie pozostają bez wpływu na procesy rodnikowe zachodzące w komórkach. Mechanizm rodnikowy jest jedną z teorii oddziaływania biologicznego na organizmy żywe [27]. Nadmiar wolnych rodników i ich pochodnych w komórkach prowadzi do rozwoju stresu oksydacyjnego, co jest przyczyną wielu chorób, m.in. zapalnych.

W badaniach [28] zaobserwowano m.in. nasilenie generacji wolnych rodników tlenowych (reactive oxygen species – ROS) w sercu zwierząt doświadczalnych, a Raus i wsp. [29] wykazali, że narażenie na ELFMF o parametrach 50 Hz i 0,5 mT przez 7 dni może zmniejszyć stres oksydacyjny w mózgu myszokoczków. Badania *in vivo* oraz *in vitro* sugerują, że ELFMF oddziałuje z receptorami komórkowymi i aktywuje swoiste ścieżki molekularne prowadzące do zmiany zdolności homeostazy redox [30].

Na podstawie cytowanych prac i badań własnych można stwierdzić, że wpływ pola magnetycznego na stan zapalny organizmu jest różny w zależności od badanych parametrów tego pola oraz tkanek czy komór-

rek. Z tego powodu konieczne jest dalsze prowadzenie badań nad wpływem pól magnetycznych na mediatory pro- i przeciwzapalne, które mają znaczenie w rozwoju procesu zapalnego.

WNIOSKI

1. Ekspozycja szczurów w polu magnetycznym niskiej częstotliwości, generowanym przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie przez urządzenie do magnetoterapii o ustawionych parametrach: częstotliwość – 40 Hz, indukcja międzyszczytowa – 7 mT, spowodowała znamienny wzrost stężenia IL-6 w sercach w porównaniu z grupą kontrolną. Pole magnetyczne stosowane przez 60 min powodowało natomiast nieistotny statystycznie wzrost stężeń IL-6 w sercach w porównaniu z grupą kontrolną.
2. Ekspozycja szczurów w polu magnetycznym niskiej częstotliwości, generowanym przez 30 min/dzień przez 2 tygodnie przez urządzenie do magnetoterapii o ustawionych parametrach: częstotliwość – 40 Hz, indukcja międzyszczytowa – 7 mT, spowodowała nieistotny spadek stężeń IL-6 w mózgu w porównaniu z grupą kontrolną. Wydłużenie czasu ekspozycji do 60 min spowodowało istotny statystycznie spadek stężenia IL-6 w mózgu szczurów w porównaniu z grupą kontrolną.
3. Wpływ pola magnetycznego na stan zapalny organizmu jest różny w zależności od parametrów pola magnetycznego oraz tkanek czy komórek, na które działa, dlatego konieczne są dalsze badania nad wpływem pól magnetycznych na mediatory pro- i przeciwzapalne, mające znaczenie w rozwoju procesu zapalnego.

PIŚMIENNICTWO

1. Dunajski Z.: Biomagnetyzm. Wydawnictwo Komunikacji Łączności, Warszawa 1990
2. Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. Alfa Medica Press, Bielsko-Biała 2002
3. Ciejka E., Gorąca A.: The influence magnetic field on experimental animal's blood pressure. *Acta Bio-Opt. Inf. Med. Biomed. Eng.* 2006;12:257–260
4. Sieroń A., Glinka M.: Wpływ niskozmiennych pól magnetycznych na proces gojenia się ran. *Balneolog. Pol.* 1999; XLI(1–2):75–81
5. Straburzyńska-Lupa A., Straburzyński G.: Fizjoterapia z elementami klinicznymi. Tom 1. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2008

6. Długosz M., Stasiak-Pietrzak A., Krekora K., Czernicki J.: Pola magnetyczne w diagnostyce, terapii i rehabilitacji chorych na stwardnienie rozsiane. *Balneolog. Pol.* 2009;53(3, 117):182–188
7. Mancuso M., Ghezzi V., di Fede G.: Utilization of extremely low frequency (ELF) magnetic fields in chronic disease; five years experience: Three case reports. *Electromagn. Biol. Med.* 2007;26(4):311–313, <https://doi.org/10.1080/15368370701763600>
8. Calkosiński I., Dobrzyński M., Calkosińska M., Seweryn E., Bronowicka-Szydełko A., Dzierżba K. i wsp.: Charakterystyka odczynu zapalnego. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2009;63:395–408
9. Maśliński S., Ryżewski J.: Patofizjologia. Podręcznik dla studentów medycyny. Tom 1. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2015
10. Brennan F.M., McInnes I.B.: Evidence that cytokines play a role in rheumatoid arthritis. *J. Clin. Invest.*, 3 listopada 2008;118(11):3537–3545, <https://doi.org/10.1172/JC-136389>
11. Kontny E., Maśliński W.: Interleukina 6 – znaczenie biologiczne i rola w patogenezie reumatoidalnego zapalenia stawów. *Reumatologia* 2009;47(1):24–33
12. Więckiewicz J.L.: Polimorfizm regionu promotowego genu interleukiny 6 (IL-6) u osób chorujących na chorobę niedokrwienną serca [praca doktorska]. Gdański Uniwersytet Medyczny, Gdańsk 2006
13. Krejca M., Krzych Ł.J., Wasiak M., Bochenek A., Mróz I.: Stężenie czynnika wzrostu komórek śródbłonna, białka C-reaktywnego i interleukiny 6 u chorych zakwalifikowanych do leczenia operacyjnego choroby wieńcowej. *Kardiochir. Torakochirurgia Pol.* 2009;6(4):344–350
14. Tzoulaki I., Murray G.D., Lee A.J., Rumley A., Lowe G.D., Fowkes F.G.: C-reactive protein, interleukin-6, and soluble adhesion molecules as predictors of progressive peripheral atherosclerosis in the general population. *Circulation* 2005;112:976–983, <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.104.513085>
15. Zabłocka A., Janusz M.: Struktura i funkcjonowanie ośrodkowego układu nerwowego. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2007;61:454–460
16. Kępa L., Oczko-Grzesik B., Boroń-Kaczmarek B.: Stężenie interleukiny-6 (IL-6) w płynie mózgowo-rdzeniowym chorych z ropnymi, bakteryjnymi zapaleniami opon i mózgu – obserwacje własne. *Przegl. Epidemiol.* 2014;68:743–746
17. Reale M., Kamal M.A., Patruno A., Costantini E., D'Angelo C., Pesce M. i wsp.: Neuronal cellular responses to extremely low frequency electromagnetic field exposure: Implications regarding oxidative stress and neurodegeneration.

- ation. PLoS One, 15 sierpnia 2014;9(8):e104973, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104973>
18. Salehi I., Sani K.G., Zamani A.: Exposure of rats to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) alters cytokines production. *Electromagn. Biol. Med.*, marzec 2013;32(1):1–8, <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.692343>
 19. Konieczny P.: Ocena przeciwbólowego działania wolnozmennych pól magnetycznych u zwierząt doświadczalnych [praca doktorska]. Śląska Akademia Medyczna w Katowicach, Wydział Lekarski w Zabrze, Zabrze 1998
 20. Pesce M., Patruno A., Speranza L., Reale M.: Extremely low frequency electromagnetic field and wound healing: Implication of cytokines as biological mediators. *Eur. Cytokine Netw.* 2013;24(1):1–10, <https://doi.org/10.1684/ecn.2013.0332>.
 21. Salehi I., Sani K.G., Zamani A.: Exposure of rats to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) alters cytokines production. *Electromagn. Biol. Med.* 2013; 32(1):1–8, <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.692343>
 22. Ushiyama A., Masuda H., Hirota S., Ohkubo C.: Subchronic effects on leukocyte-endothelial interactions in mice by whole body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *In Vivo* 2004;18(4):425–432
 23. Frahm J., Lantow M., Lupke M., Weiss D.G., Simkó M.: Alteration in cellular functions in mouse macrophages after exposure to 50 Hz magnetic fields. *J. Cell. Biochem.* 2006;99(1):168–177
 24. Rasouli J., Lekhraj R., White N.M., Flamm E.S., Pilla A.A., Strauch B. i wsp.: Attenuation of interleukin-1beta by pulsed electromagnetic fields after traumatic brain injury. *Neurosci. Lett.*, 21 czerwca 2012;519(1):4–8, <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.03.089>
 25. Zhao L., Zhao D.M., Wei J.H., Wang Y.Q., Huang Z.M.: [Effect of extremely low frequency magnetic field on the focal brain injury in rats]. *Space Med. Med. Eng. (Beijing)*, luty 2003;16(1):75–76. Chiński.
 26. Reale M., Kamal M.A., Patruno A., Costantini E., D'Angelo C., Pesce M. i wsp.: Neuronal cellular responses to extremely low frequency electromagnetic field exposure: Implications regarding oxidative stress and neurodegeneration. PLoS One 2014;9(8):e104973, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104973>
 27. Zmysłony M.: Działanie stałych i sieciowych pól magnetycznych występujących w środowisku człowieka na układy biologiczne. Mechanizm rodnikowy [praca habilitacyjna]. Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2002
 28. Goraca A., Ciejka E., Piechota A.: Effects of extremely low frequency magnetic field on the parameters of oxidative stress in heart. *J. Physiol. Pharmacol.*, czerwiec 2010;61(3): 333–338
 29. Raus B.S., Selakovic V., Radenovic L., Prolic Z., Janac B.: Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0,5 mT) reduces oxidative stress in brain of gerbils submittendo global cerebral ischemia. PLoS One 2014;19:9(2):e88921, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088921>
 30. Mattsson M.O., Simkó M.: Is there a relation between extremely low frequency magnetic field exposure, inflammation and neurodegenerative diseases? A review of *in vivo* and *in vitro* experimental evidence. *Toxicology*, 15 listopada 2012;301(1–3):1–12, <https://doi.org/10.1016/j.tox.2012.06.011>