

Jolanta Karpowicz¹, Krzysztof Gryz¹

Piotr Politański², Marek Zmysłony²

NARAŻENIE NA POLE MAGNETOSTATYCZNE I ZAGROŻENIA ZDROWIA PRZY OBSŁUDZE SKANERÓW REZONANSU MAGNETYCZNEGO

EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELD AND HEALTH HAZARDS DURING THE OPERATION OF MAGNETIC RESONANCE SCANNERS

¹ Centralny Instytut Ochrony Pracy — Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa; Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych

² Zakład Ochrony Radiologicznej, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź; Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych

STRESZCZENIE

Skannery rezonansu magnetycznego (S-RM) należą do najnowocześniejszych urządzeń diagnostyki obrazowej, przy której przygotowanie i przeprowadzenie badania związane jest z narażeniem pracowników na pole magnetostaticzne (PMS). W pracy przedstawiono dane na temat narażenia pracowników na PMS przy tych urządzeniach oraz przeanalizowano literaturę dotyczącą działania biologicznego i zagrożeń zdrowia związanych z PMS. Miało to na celu rozpatrzenie zasadności zliberalizowania przepisów dotyczących ochrony pracowników związanych z diagnostyką RM przed PMS. Pomiary w otoczeniu magnesów 1,5T S-RM wykazują, że narażenie na PMS w otoczeniu różnych S-RM jest uzależnione zarówno od indukcji magnesu, jak i od rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w poszczególnych urządzeniach oraz organizacji pracy. Przy rutynowych badaniach jednego pacjenta elektroradiolog przebywa ok. 1,5–7 min w PMS przekraczającym 0,5 mT, a 1,3 min w PMS przekraczającym 70 mT. Przy badaniach pacjentów wymagających większej uwagi czas ten może być znacznie dłuższy. Wartości średnie (B_{sr}) narażenia pracownika na PMS wynoszą 5,6–85 mT (średnio 30 ± 19 mT, $N = 16$). Przytoczone dane pokazują, że spełnienie formalnych wymagań prawa pracy dotyczących narażenia pracowników na PMS jest możliwe przy właściwej organizacji stanowisk i procedur pracy oraz świadomości pracowników, przy jakim asystowaniu pacjentowi nie narażają się na silne PMS. Analiza dostępnej literatury dotyczącej biologicznego działania PMS wykazała brak danych dotyczących skutków zdrowotnych narażenia wieloletniego pracowników, przy dużej ilości danych wskazujących na możliwość biologicznego działania PMS. W związku z tym radykalne łagodzenie wymagań dotyczących narażenia głowy i tułowia pracowników jest przedwczesne, a ponadto nie jest warunkiem koniecznym rozwoju diagnostyki RM. Przed przystąpieniem do takich prac konieczne wydaje się przeprowadzenie szeroko zakrojonych, międzynarodowych badań stanu zdrowia pracowników narażonych na pola elektromagnetyczne S-RM. Med. Pr. 2011;62(3):309–321

Słowa kluczowe: elektroradiolog, zagrożenia zawodowe, pola elektromagnetyczne, prądy indukowane, ekspozymetria, wolne rodniki

ABSTRACT

Magnetic resonance imaging (MRI) scanners belong to the most modern imaging diagnostic devices, which involve workers' exposure to static magnetic fields (SMF) during the preparation and performance of MRI examinations. This paper presents the data on workers' exposure to SMF in the vicinity of MRI scanners and the analysis of SMF-related biological effects and health hazards to find out whether softening the legislative requirements concerning protection against SMF exposure of workers involved in MRI diagnostics is justified. Measurements in the vicinity of 1.5 T MRI magnets showed that exposure to SMF by various scanners depends on both SMF of magnets and scanners design, as well as on work organization. In a routine examination of one patient the radiographer is exposed to SMF exceeding 0.5 mT for app. 1.5–7 min, and up to 1.3 min to SMF exceeding 70 mT. In examinations of patients who need more attention, the duration of exposure may be significantly longer. The mean values (B_{mean}) of exposure to SMF are 5.6–85 mT (mean 30 ± 19 mT, $N = 16$). These data demonstrate that only well designed procedures, proper organization of workplace and awareness of workers how to attend the patients without being exposed to strong SMF allow for meeting the requirements of labor law concerning workers' exposure to SMF. The analysis of the available literature on biological effects of SMF has disclosed the lack of data on health effects of many years exposure of workers and the abundance of data demonstrating the biological activity of SMF. Therefore, a radical softening of legislative requirements concerning the exposure of workers' head or trunk is premature, and what is more, it is not indispensable for the development of MRI diagnostic. Such an action should be preceded by extensive international investigations on the health status of workers exposed to electromagnetic fields by MRI scanners. Med Pr 2011;62(3):309–321

Key words: radiographer, occupational hazards, electromagnetic fields, induced currents, exposimetry, free radicals

Adres 1. autorki: Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych,
Centralny Instytut Ochrony Pracy — Państwowy Instytut Badawczy (CIOP — PIB),
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: jokar@ciop.pl
Nadesłano: 19 maja 2011
Zatwierdzono: 1 czerwca 2011

WPROWADZENIE

Wykorzystanie zjawiska rezonansu magnetycznego w tzw. skanerach rezonansu magnetycznego — S-RM (magnetic resonance imaging scanners — MRI scanners) jest jedną z najnowocześniejszych technik obrazowej diagnostyki medycznej, rozwijającą się dynamicznie od początku lat 80. XX w. W ostatnich latach stale wzrasta ilość S-RM, badanych nimi pacjentów i asystujących pacjentom pracowników.

Diagnostyka z wykorzystaniem S-RM wymaga umieszczenia diagnozowanej części ciała pacjenta w obszarze bardzo silnego pola magnetostaticznego (PMS), kilkadziesiąt tysięcy razy silniejszego od naturalnego pola geomagnetycznego. Rozwój technologiczny S-RM związany jest z wykorzystywaniem źródeł coraz silniejszego PMS, umożliwiających wprowadzanie nowych procedur diagnostycznych oraz skracanie czasu trwania pojedynczych badań.

Pola magnetostaticzne wytwarzane są najczęściej nieprzerwanie, tj. 24 godziny na dobę, przez elektromagnesy nadprzewodzące (1). Pola te oddziałują zarówno na pacjenta, jak i na wszystkie osoby przebywające w otoczeniu obudowy magnesu — na osoby asystujące pacjentom, a także wykonujące różnorodne czynności administracyjno-techniczne, np. sprzątanie. Pracownicy obsługujący S-RM należą do osób narażonych na najsilniejsze PMS z występujących w środowisku pracy. Narażenie to wskutek aktywności fizycznej pracowników zawiera również składową pola magnetycznego zmiennego w czasie.

Skutki oddziaływania PMS na stan zdrowia są stosunkowo słabo poznane w porównaniu z bogatą dokumentacją tego typu oddziaływań pola elektromagnetycznego częstotliwości przemysłowej lub radiofalowej. Wobec ograniczonych i niespójnych danych epidemiologicznych i biomedycznych (2,3) w monografii Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) (4) podano, że nie ma wystarczających danych naukowych do ustalenia ryzyka zdrowotnego oddziaływania PMS. Wciąż nie rozstrzygnięto kontrowersji na temat odległych skutków zdrowotnych oddziaływania pola elektromagnetycznego na pracowników, takich jak działanie kancerogenne czy zwiększone zagrożenia chorobami neurodegeneratywnymi, zwłaszcza stwardnieniem zanikowym bocznym (amyotrophic lateral sclerosis — ALS) i chorobą Alzheimera (5). Z kolei Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer — IARC) sklasyfikowała pola magnetyczne małej częstotliwości (extremely low frequency — ELF) oraz

pola częstotliwości radiowych (radiofrequency electromagnetic fields) w grupie 2B — czynników możliwe kancerogennych dla ludzi (6,7). Coraz lepiej udokumentowane są hipotezy dotyczące mechanizmów oddziaływania pól elektromagnetycznych, takich jak genotoksyczność, zmiany peroksydacji lipidów czy ekspresji niektórych białek, tj. mechanizmów o udowodnionych związkach z patogenezą wielu chorób.

Badania dotyczące oceny zagrożeń związanych ze skutkami narażenia na PMS należą do priorytetów badawczych, m.in. WHO, Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniami Niejonizującymi (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection — ICNIRP) i programów badawczych Unii Europejskiej. Rozpoznanie charakterystyki indywidualnego narażenia na PMS pracowników z różnych grup zawodowych jest istotnym elementem planowania takich badań oraz analizy korelacji parametrów biomedycznych stanu zdrowia uczestników badań z parametrami narażenia środowiskowego, a także oceny zagrożeń zawodowych i skuteczności działań prewencyjnych z obszaru profilaktyki technicznej i organizacyjnej.

Rutynowej ocenie podlega jedynie poziom narażenia pracowników na PMS, oceniany na podstawie rozkładu przestrzennego pola w otoczeniu magnesu. Monitoring parametrów indywidualnego narażenia na PMS (tzw. badania ekspozymetryczne) należy do nowych technik oceny zagrożeń elektromagnetycznych, dopiero rozwijanych zarówno w Polsce, jak i w innych krajach europejskich (8).

Głównym celem niniejszej pracy było scharakteryzowanie parametrów narażenia pracowników na PMS w otoczeniu S-RM oraz identyfikacja czynników determinujących poziom narażenia, a także przegląd literatury dotyczącej biologicznego działania PMS o wartościach, jakie występują przy S-RM, i oceny zawodowych zagrożeń zdrowia. Temat ujęto w kontekście zasad stanowienia dopuszczalnych narażeń na czynniki środowiskowe w miejscu pracy. Należy pamiętać, że najwyższe dopuszczalne natężenia fizycznego czynnika szkodliwego dla zdrowia ustalono jako wartość dopuszczalną oddziaływania na pracownika przez okres jego aktywności zawodowej, które nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń (9), czyli odnoszą się zarówno do przeciwdziałania zagrożeniom występującym w czasie oddziaływania danego czynnika, jak i do przeciwdziałania zagrożeniom odległym.

Placówki prowadzące w Polsce rutynowe badania diagnostyczne techniką rezonansu magnetycznego

go (RM) i wykorzystywane w nich rodzaje urządzeń zidentyfikowano na podstawie dostępnych w serwisach internetowych danych o placówkach świadczących usługi medyczne z tego zakresu. Warunki wykonywania badań RM rozpoznano w znacznym stopniu dzięki informacjom pozyskanym w bezpośrednich kontaktach z pracownikami w czasie seminariów i szkoleń specjalistycznych. Prezentowane dane ukazują więc typowe warunki narażenia w polskich placówkach RM.

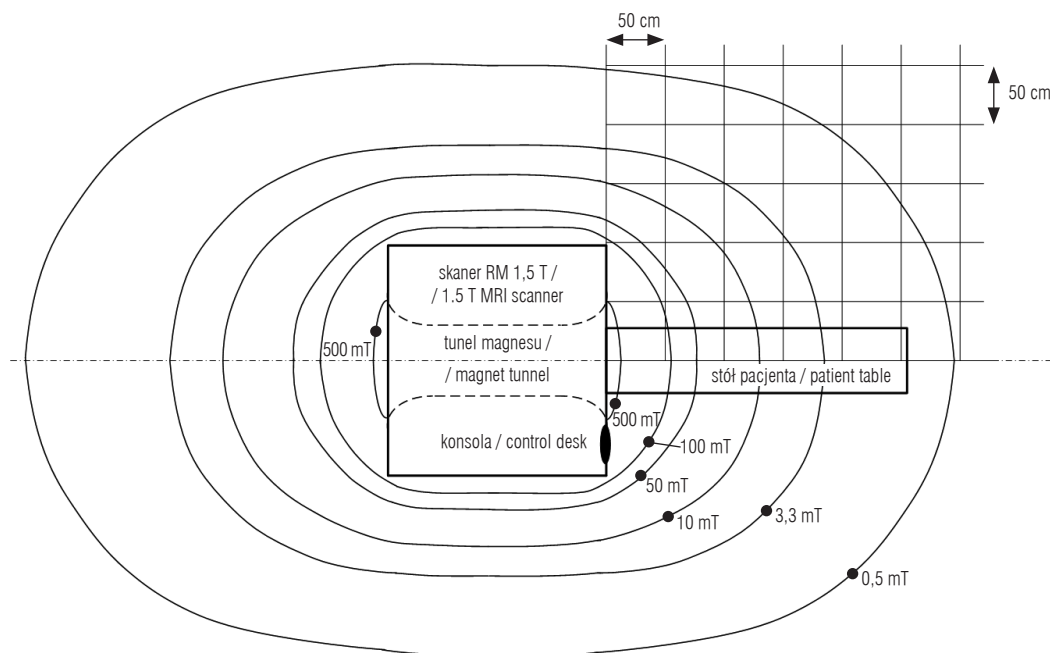
NARAŻENIE PRACOWNIKÓW NA PMS SKANERÓW RM

Według danych Państwowej Inspekcji Sanitarnej w Polsce przy diagnostyce RM zatrudnionych jest ok. 700–1000 pracowników, a wśród nich m.in. elektroradiolodzy obsługujący badania RM, pielęgniarki, anesteziolodzy i sprzętacze. Zwykle w ciągu dnia pracy zespół 1–4 pracowników (elektroradiologów i pielęgniarek) wykonuje od 10 do 30 badań pacjentów. Najbardziej popularne są badania głowy, kręgosłupa szyjnego, tułowia i stawów kończyn.

W ramach badań wykonanych w latach 2008–2010 przez Centralny Instytut Ochrony Pracy — Państwowy Instytut Badawczy (CIOP — PIB) zidentyfikowano ponad 110 S-RM eksploatowanych w Polsce w placówkach prowadzących rutynowe badania dia-

gnostyczne techniką RM, wyposażanych w magnesy (cewki nadprzewodzące, magnesy stałe lub elektromagnesy), o poziomach indukcji B_0 pola diagnostycznego: 0,2 T; 0,3 (0,35) T; 0,5 T; 1,0 T; 1,5 T lub 3,0 T. Skanery rezonansu magnetycznego wytwarzające silniejsze pola nie były w tym okresie w Polsce eksploatowane. Stopniowo wzrasta liczba S-RM o indukcji B_0 równej 3 T, które obecnie stanowią ok. 10% wszystkich urządzeń. Skanery rezonansu magnetycznego z magnesami o indukcji B_0 równej 1,5 T stanowią ok. 50% urządzeń eksploatowanych w kraju. W związku z tym w pracy omówiono szczegółowo narażenie na PMS przy 1,5 T S-RM.

Skaner RM umieszczony jest w kabinie ekranującej zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne o różnych wymiarach, typowo ok. 5×5 m. Pomiary rozkładu pól w otoczeniu magnesów S-RM, wykonane przez CIOP — PIB wykazały, że zasięgi PMS występującego w otoczeniu obudowy magnesów różnych S-RM są uzależnione zarówno od indukcji magnesu B_0 , jak i od rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w poszczególnych urządzeniach (10,11). Przy najczęściej stosowanych w Polsce 1,5 T S-RM zasięg pól strefy niebezpiecznej, gdzie pracownicy nie powinni przebywać, wynosi (w osi tunelu magnesu) ok. 55 cm od obudowy magnesu, a strefa zagrożenia, w której oceniany jest wskaźnik ekspozycji pracownika, sięga odległości ok. 115 cm (ryc. 1).



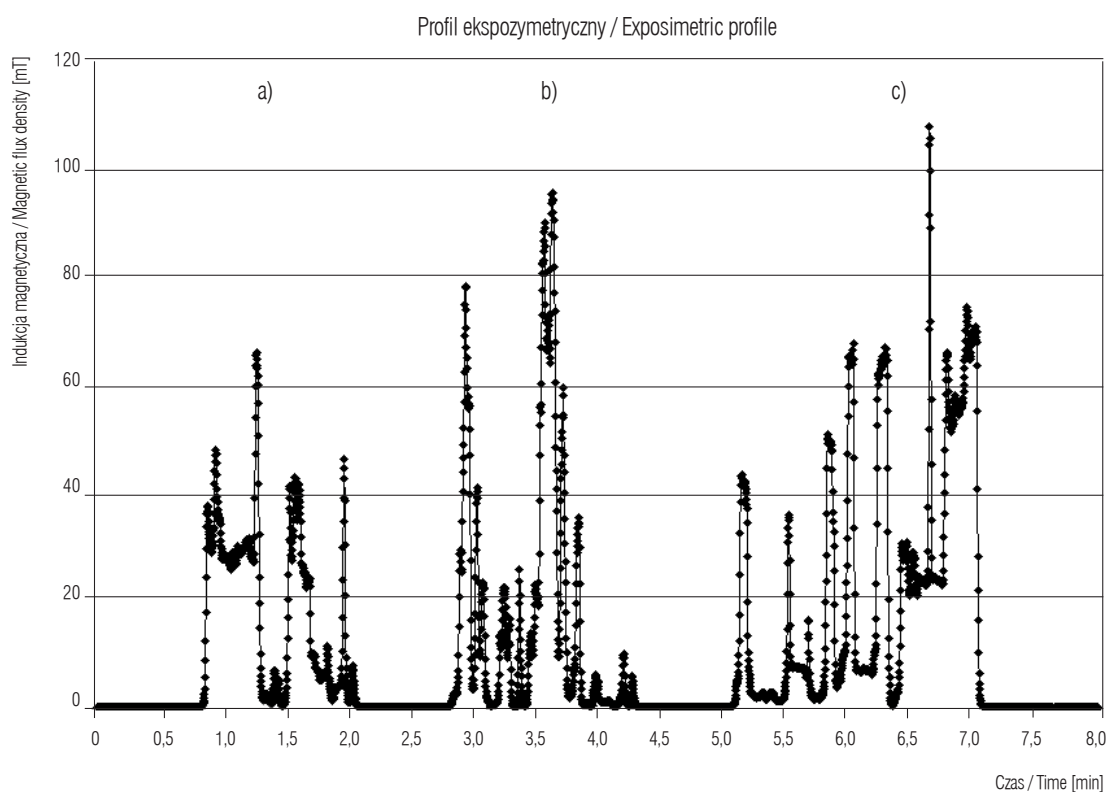
Ryc. 1. Rozkład pola magnetostaticznego w otoczeniu skanera RM z magnesem 1,5 T, reprezentujący typowe wyniki pomiarów wykonanych przy skanerach takiego typu.

Fig. 1. Static magnetic field spatial distribution in the vicinity of MRI scanner of 1.5 T magnet, representing typical measurement results performed by scanners of that type.

Czynności wykonywane przez pracowników (elektrodiagnostów i pielęgniarki) przy rutynowych badaniach składają się z powtarzających się sekwencji prac wykonywanych przy kolejnych badaniach (9). Wszystkie czynności w pobliżu magnesu S-RM związane są z narażeniem na PMS. Narażenie pracowników można ocenić, analizując tzw. profile ekspozymetryczne, które CIOP—PIB rejestruje metodą umożliwiającą wykonywanie pomiarów w czasie rzeczywistych aktywności pracowników, w sposób niezakłócający badań pacjentów (10), z wykorzystaniem zasilanego bateryjnie przenośnego rejestratora z hallotronowymi czujnikami izotropowymi.

Na rycinie 2. przedstawiono przykładowy indywidualny profil narażenia pracownika, zarejestrowany ekspozymetrem.

Z kolei w tabeli 1. przedstawiono parametry przykładowych 16 profili ekspozymetrycznych, zarejestrowanych przy S-RM z magnesami tunelowymi 1,5 T, podczas obsługi różnego typu badań — od najprostszyc do utrudnionych stanem zdrowia pacjenta, wykonanych zarówno w S-RM o optymalnej konstrukcji, jak i skonstruowanych bez troski o ergonomię ich obsługi. Wyniki badań ekspozymetrycznych scharakteryzowano przez: wartość maksymalną (B_{max}), średnią (B_{sr}) i medianę (B_{med}) oraz czas narażenia na pola strefy ograniczonego dostępu dla osób postronnych (tj. $B > 0,5$ mT — oznaczony $T_{>0,5}$) i czas narażenia na pola o indukcji B przekraczającej 70 mT, przyjętej jako wyróżnik narażenia szczególnie silnego (oznaczony $T_{>70}$). Wszystkie parametry scharakteryzowano wartościami maksymalnymi, minimalnymi, średnimi, medianą i odchyleniem standardowym wyników.



- a) Po zakończeniu badania wysunięcie przy użyciu konsoli stołu z pacjentem z tunelu magnesu; wyprowadzenie zbadanego pacjenta z pomieszczenia skanera / After patient scanning, moving out the table with the patient from the magnet tunnel with use of the control desk and leading the patient out of the MRI room.
- b) Zmiana cewek diagnostycznych / Diagnostic coils exchange.
- c) Wprowadzenie pacjenta na kolejne badanie i ułożenie go oraz cewek diagnostycznych na stole; wsunięcie przy użyciu konsoli stołu z pacjentem do tunelu magnesu celem wykonania badania / Before new scanning when the patient enters the MRI room and is laid down on the table and when the patient table is moved into the magnet tunnel with use of the control desk.

Ryc. 2. Narażenie elektrodziagnosty na pole magnetostaticzne przy typowej sekwencji czynności przy skanerze RM (profil ekspozymetryczny, częstotliwość próbkowania ok. 6 Hz).

Fig. 2. Radiographers' exposure to static magnetic field while operating MRI scanner, performing a typical sequence of activities (exposimetric profile, sampling rate app. 6 Hz).

Tabela 1. Parametry statystyczne typowych profili ekspozymetrycznych narażenia pracownika na pole magnetostatyczne, zarejestrowanych przy skanerach rezonansu magnetycznego 1,5 T w czasie obsługi badań RM (próbkowanie — 6 Hz)
Table 1. Statistical parameters of typical exposimetric profiles of workers' exposure to static magnetic field, registered by 1.5 T MRI scanners while performing MRI diagnostics (sampling rate — 6 Hz)

Profil ekspozymetryczny Exposimetric profile	Parametry statystyczne 16 indywidualnych profili ekspozymetrycznych Statistical parameters of 16 individual exposimetric profiles							Identyfikacja przyczyn poziomu narażenia Identification of reasons for exposure level
	B _{max} [mT]	B _{sr} [mT]	B _{med} [mT]	B-SD [mT]	T _{>70} [s]	T _{>0,5} [s]	T _{>70} /T _{>0,5} [%]	
PS1	85	23	17	22	8,0	180	4,4	–
PS2	78	27	29	18	1,5	140	1,0	–
PS3	96	23	19	19	9,5	211	4,5	–
PS4	140	26	17	29	11	140	8,5	obecność pracownika blisko magnesu wymuszona konstrukcją skanera / the presence of worker close to the magnet due to scanner design
PS5	200	44	11	57	17	72	23	obecność pracownika blisko magnesu wymuszona konstrukcją skanera / the presence of worker close to the magnet due to scanner design
PS6	180	36	19	39	18	120	15	obecność pracownika blisko magnesu wymuszona konstrukcją skanera / the presence of worker close to the magnet due to scanner design
PS7	220	40	36	43	16	110	14	obecność pracownika blisko magnesu wskutek braku wiedzy o zagrożeniach elektromagnetycznych / the presence of worker close to the magnet due to the lack of knowledge on electromagnetic hazards
PS8	17	5,6	4,9	3,5	0,0	86	0,0	warunki i miejsce pracy jak w PS7, pracownik po szkoleniu nt. zagrożeń elektromagnetycznych / conditions as in PS7, worker is informed about electromagnetic hazards
PS9	190	55	54	38	25	110	23	obecność pracownika blisko magnesu wskutek braku wiedzy o zagrożeniach elektromagnetycznych / the presence of worker close to magnet due to the lack of knowledge on electromagnetic hazards
PS10	120	26	22	24	5,0	210	2,4	–
PN1	130	25	15	28	20	240	8,1	–
PN2	110	20	9,8	22	6,5	340	1,9	–
PN3	90	17	1,0	16	8,5	410	2,1	–
K1	13	5,8	6,2	1,5	0,0	180	0,0	–
K2	170	85	95	32	83	110	77	obecność pracownika blisko magnesu wskutek braku wiedzy o zagrożeniach elektromagnetycznych / the presence of worker close to magnet due to the lack of knowledge on electromagnetic hazards
K3	64	26	23	11	0,0	79	0,0	warunki i miejsce pracy jak w K2, pracownik po szkoleniu nt. zagrożeń elektromagnetycznych / conditions as in K2, workers are informed about electromagnetic hazards
Parametry statystyczne grupy 16 indywidualnych profili ekspozymetrycznych narażenia na PMS przy obsłudze badań RM Statistical parameters of a group of 16 individual exposimetric profiles of exposure to SMF while performing MRI diagnostics								
Średnia / Mean ±SD	120±61	30±19	24±22	25±14	14±9,0	170±94	11±4,4	
Ranga / Range	13–220	5,6–85	4,9–95	1,5–57	0,0–83	73–410	0,0–77	
Mediana / Median	110	26	18	23	20	140	19	

Średnia — wartość średnia arytmetyczna / Mean — mean arithmetic value; ranga — zakres wartości (min–max) / range — min–max range.
 Mediana — wartość mediany / Median — median value.
 B_{max} — wartość maksymalna z rejestracji indukcji magnetycznej w danym profilu ekspozymetrycznym, wyrażona w militeslach / max value of magnetic flux density registered in particular exposimetric profile, expressed in militeslas; B_{sr} — wartość średnia z rejestracji indukcji magnetycznej w danym profilu ekspozymetrycznym, wyrażona w militeslach / mean arithmetic value of magnetic flux density registered in particular exposimetric profile, expressed in militeslas; B_{med} — wartość mediany z rejestracji indukcji magnetycznej w danym profilu ekspozymetrycznym, wyrażona w militeslach / median value of magnetic flux density registered in particular exposimetric profile, expressed in militeslas; B-SD — odchylenie standardowe wartości z rejestracji indukcji magnetycznej w danym profilu ekspozymetrycznym, wyrażone w militeslach / standard deviation of magnetic flux density registered in particular exposimetric profile, expressed in militeslas; T_{>70} — czas narażenia na pole magnetostatyczne o B > 70 mT, wyrażony w sekundach / duration of exposure to SMF of B > 70 mT, expressed in seconds; T_{>0,5} — czas narażenia na pole magnetostatyczne o B > 0,5 mT, wyrażony w sekundach / duration of exposure to SMF of B > 0.5 mT, expressed in seconds.
 Oznaczenia profili ekspozymetrycznych / Exposimetric profiles notation: P — narażenie elektroradiologa / radiographer's exposure; S — narażenie przy pacjentach sprawnych fizycznie / exposure when attending physically active patients; N — narażenie przy pacjentach z niesprawnościami fizycznymi / exposure when attending disabled patients; K — narażenie pielęgniarki / nurse's exposure.

Profile ekspozymetryczne wybrane do prezentacji typowych warunków narażenia pracowników na PMS zarejestrowano w czasie typowych aktywności:

- elektroradiologów — w czasie sekwencji czynności związanych z zakończeniem badania i wyprowadzeniem pacjenta z magnesu S-RM, przygotowaniem następnego badania i wprowadzeniem kolejnego pacjenta do magnesu;
- pielęgniarek — w czasie sekwencji czynności związanych z wejściem do kabiny ekranowanej S-RM i zaaplikowaniem pacjentowi kontrastu.

Do analizy wybrano 13 profili ekspozycji elektroradiologów — 10 zarejestrowanych przy pacjentach sprawnych ruchowo (oznaczonych PS) i 3 zarejestrowane przy pacjentach z niesprawnościami fizycznymi (oznaczonych PN). Wybrano również 3 profile ekspozycji pielęgniarek aplikujących pacjentom dożylnie kontrast (oznaczone K).

Poziom narażenia pracowników zależy od konstrukcji S-RM i stanu zdrowia pacjenta, ale również od sposobu wykonywania pracy — determinujących odległość od magnesu, w jakiej są wykonywane czynności związane z przeprowadzeniem badań. Dla oceny zagrożeń przy poszczególnych urządzeniach istotne jest rozważenie, z jakiej odległości od magnesu można wykonać prace niezbędne do przeprowadzenia badań diagnostycznych. Przykładowo, konsola do sterowania położeniem stołu pacjenta umieszczona jest na obudowie magnesu. Sterowanie położeniem stołu oraz przyłączanie kabla zasilającego cewki można wykonać z odległości wyciągniętej ręki od obudowy magnesu, czyli zależnie od wzrostu pracownika będzie to ok. 60–90 cm — według Gedliczki zasięg przedni ręki dla mężczyzn wynosi min. 81 cm, maks. 93 cm, a dla kobiet — min. 75 cm, maks. 86 cm (12).

Pielęgniarka natomiast celem wkłucia i ręcznej aplikacji kontrastu do żyły w zgięciu łokciowym lub przy dłoni zbliża się do obudowy magnesu na odległość od ok. 60 cm do ok. 100 cm, w zależności od położenia pacjenta na stole częściowo lub całkowicie wysuniętym z magnesu. Alternatywą jest stosowana w wielu placówkach automatyczna strzykawka, której użycie skraca czas narażenia pielęgniarki do potrzebnego na przyłączenie strzykawki pacjentowi, co także może odbyć się z daleka od magnesu.

Elektroradiolodzy nie przebywają w pobliżu magnesu w czasie trwania badania — nadzorują badanie ze stanowiska komputerowego sterowania pracą tomografu. Podkreślenia wymaga jednak, że na PMS występujące w otoczeniu magnesu narażenia są również

pracownicy, którzy np. sprzątają otoczenie magnesu lub czyszczą jego obudowę.

Omawiane badania wykazały, że elektroradiolog przy typowych badaniach przebywa w PMS stref ochronnych w otoczeniu magnesu w ciągu ok. 1,5–7 minut podczas badania jednego pacjenta, a narażenie pielęgniarki podającej kontrast trwa 1,5–3 minut. Czas narażenia na pole o indukcji przekraczającej 0,5 mT wynosi przy tych czynnościach ok. 73–410 sekund (średnia = 170, mediana = 140), a czas narażenia na PMS o indukcji przekraczającej 70 mT wynosi 0–83 sekund (średnia = 14, mediana = 20). Przy badaniach pacjentów wymagających większej uwagi czas ten może być znacznie dłuższy.

Maksymalny poziom narażenia B_{\max} wynosi 13–220 mT (średnia = 120, mediana = 110), a średni poziom narażenia zarejestrowany w poszczególnych profilach B_{sr} — 5,6–85 mT (średnia = 30, mediana = 26).

Najmniejsze poziomy narażeń zaprezentowane w zestawieniu odpowiadają profilom zarejestrowanym w czasie obsługi optymalnie skonstruowanego S-RM przez pracowników poinformowanych o naturze zagrożeń elektromagnetycznych (na podstawie wyników wykonanych wcześniej w danej placówce badań ekspozymetrycznych) — profile PS8 i K3.

Wynika z tego, że przy rutynowej obsłudze badań w S-RM poziom narażenia na pole magnetostatyczne jest bardzo zróżnicowany. Przy S-RM o określonym poziomie pola B_0 , tj. porównywalnych ze względu na potencjał diagnostyczny, różnice poziomu narażenia na PMS wynikają ze zmienności warunków pracy przy różnych badaniach pacjentów lub różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń. Dla zaprezentowanych profili ekspozymetrycznych stosunek maksymalnej wartości parametru B_{\max} do wartości minimalnej tego parametru wynosi ok. 17. Maksymalny poziom narażenia, zarejestrowany w poszczególnych profilach, w większości przypadków wynika z rozwiązań konstrukcyjnych urządzenia. Wyniki badań ekspozymetrycznych wskazują, że przy odpowiedniej konstrukcji i świadomości pracowników jest możliwe obsłużenie rutynowych badań RM bez narażenia na pole strefy niebezpiecznej ($B_{\max} < 100$ mT). Wartości średnie narażenia w poszczególnych profilach ekspozymetrycznych (B_{sr}) wskazują, że aktywność pracownika koncentruje się w obszarze pól strefy zagrożenia ($B = 10$ –100 mT). Średni poziom narażenia zarejestrowany w poszczególnych profilach jest zdeterminowany przez indywidualny sposób wykonywania pracy, wynikający ze świadomości pracownika na temat na-

tury zagrożeń, ergonomii przestrzeni pracy w otoczeniu urządzenia oraz stanu zdrowia pacjenta, a w znacznie mniejszym stopniu z rozwiązań konstrukcyjnych samego S-RM. Rozwiązania ergonomiczne sprzyjające ochronie pracowników to m.in. lokalizacja miejsca układania cewek lub ich przyłączania ułatwiająca/wymuszająca wykonanie takich czynności z daleka od tunelu magnesu.

W związku ze znacznym rozrzutem poziomu narażenia występuje również znaczny rozrzut wartości wskaźnika ekspozycji pracowników wykonujących te czynności. Z tego powodu do spełnienia wymagań prawa pracy konieczne bywa dzielenie obowiązków w zespole pracowników obsługujących S-RM w czasie zmiany roboczej.

Wyniki omawianych badań ekspozymetrycznych umożliwiają również analizę narażenia na prądy indukowane wskutek oddziaływania na człowieka pola magnetycznego zmiennego, wynikającego z aktywności pracownika w otoczeniu magnesów. Zagrożenia te omówiono szerzej w opracowaniu Karpowicz (11).

DZIAŁANIE BIOLOGICZNE PMS — PRZEGLĄD LITERATURY

Pacjenci przechodzą badania RM w razie konieczności wynikającej ze stanu zdrowia, zwykle nie częściej niż kilkakrotnie w ciągu całego życia, i w ich czasie narażeni są na wszystkie komponenty pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez S-RM (PMS, pole gradientowe i radiofalowe) oraz hałas impulsowy. Sytuacja pracowników jest zasadniczo odmienna — narażani na pola S-RM są wielokrotnie w ciągu każdej zmiany roboczej, przez długie lata aktywności zawodowej, a typowe komponenty narażenia to PMS i prądy indukowane w organizmie przy poruszaniu się w PMS w pobliżu magnesu.

Wobec zaprezentowanego silnego narażenia na PMS pracowników związanych z diagnostyką RM ogromnie ważnym pytaniem jest, czy takie narażenia zawodowe mogą prowadzić do utraty zdrowia.

Zagrożenia bezpieczeństwa

W PMS występuje zjawisko tzw. latających obiektów, nazywane też zagrożeniami balistycznymi. Przedmioty ferromagnetyczne, np. z elementami ze stali magnetycznej, mogą zostać porwane w kierunku magnesu, zamieniając się w lecące pociski. Może to prowadzić do ciężkich uszkodzeń ciała, a nawet śmierci pacjentów lub pracowników. W wielu opracowaniach

sprowadzono zagrożenia zdrowia pracowników obsługujących S-RM do wypadków spowodowanych przez rozpędzane do bardzo dużych prędkości obiekty ferromagnetyczne (13), dyslokację ferromagnetycznych implantów (14) bądź indukowanie w implantach prądów elektrycznych przez wykorzystywane podczas procedur obrazowania pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowych (15,16). Pole magnetostatyczne może uszkodzić nośniki pamięci magnetycznej, a pola zmienne mogą zakłócać funkcjonowanie układów elektronicznych. Informacje ostrzegające o zagrożeniach związanych z takim oddziaływaniem PMS są zwykle umieszczone w ośrodkach RM.

Zagrożenia zdrowia

Wyniki wielu badań naukowych wskazują jednak, że „latające obiekty” mogą nie być jedynymi zagrożeniami zdrowia związanymi z oddziaływaniem PMS na organizm. Ekspozycja na PMS obejmuje wszystkich bez wyjątków mieszkańców Ziemi, ponieważ naturalne pole geomagnetyczne o średniej indukcji magnetycznej B równej $40\text{--}50\ \mu\text{T}$ jest niemal wszechobecne. Wiele niepokojących obserwacji wiąże się z jego zaburzeniami. Już w latach 70. opublikowano wyniki badań, które wskazują na zależne od zaburzeń pola geomagnetycznego zmiany behawioralne u ludzi (17). Wyekranowanie pola geomagnetycznego prowadziło do desynchronizacji rytmów dobowych, które stopniowo wracały do normy po przywróceniu ekspozycji na PMS. Zarówno u ludzi, jak i zwierząt pozbawionych na okres dni/tygodni ekspozycji na pole geomagnetyczne obserwowano biologiczne odchylenia obejmujące zmiany behawioralne oraz zaburzenia nastroju. Zhang i wsp. wykazali na przykład znaczący spadek aktywności noradrenergicznej pnia mózgu chomików ekranowanych przez 60 lub 180 dni przed polem geomagnetycznym (18). Z kolei zaburzenia pola geomagnetycznego mogą wpływać na częstość prób samobójczych (19,20), zaburzenia tętna (21) czy ciśnienia krwi (22).

Pracownicy S-RM są narażeni na bardzo silne PMS — występujące zarówno wewnątrz magnesu S-RM, jak i w jego najbliższym otoczeniu. Poruszanie się w takim polu magnetycznym indukuje we wnętrzu organizmu prąd elektryczny. Ruch, który może do tego doprowadzić, to nie tylko zmiana odległości pacjenta lub pracowników względem magnesu S-RM, ale również ruchy cząsteczek wewnątrz organizmu, np. ruch krwi w układzie krwionośnym czy ruchy gałki ocznej. Symulacje dotyczące narażenia pacjentów wprowadzanych do wnętrza magnesu S-RM oraz

pracowników poruszających się w otoczeniu magnesu (23) wykazały, że przy S-RM o indukcji 7 T prędkość około 1,5 m/s (czyli 5,4 km/godz. — co nie przekracza prędkości marszu człowieka) w okolicy krańca tunelu magnesu skutkowałaby prądem o gęstości około 1,1 A/m². Z kolei Kangarlu i Robitaille wskazują na wartość 1 A/m², powyżej której możliwe są szkodliwe dla zdrowia skutki wynikające z pobudzenia nerwów i tkanki mięśniowej (24). Dla 4 T S-RM pacjent poruszający się do wnętrza cewki elektromagnesu z prędkością 0,5 m/s jest narażony na zaindukowany w organizmie prąd o gęstości 0,2 A/m².

Jako ciekawostkę należałoby wskazać, że Crozier i Liu podawali w swojej pracy wartość 0,48 A/m² jako wystarczającą do pobudzenia nerwów obwodowych, powołując się na pracę Kangarlu i Robitaille, mimo że wartość ta nie pojawia się w tej ostatniej pracy. Błąd ten został powielony również w monografii WHO (4). Ponadto, Crozier nie uwzględnił w swoich pracach zagrożeń wynikających dla pracowników z wykonywania ruchów obrotowych, przy których wartość prądów indukowanych w organizmie jest wielokrotnie większa niż przy ruchach translacyjnych (11).

Prądy indukowane mogą wpływać na parametry neurobehawioralne osób poruszających się w PMS. De Vocht i wsp. badający działanie pól magnetycznych występujących w S-RM o wartości 1,5 T i 3 T, stwierdzili występowanie zaburzeń wzrokowych (-2,1%/100 mT) i słuchowych (-1,0%/100 mT), pamięci operacyjnej, koordynacji ręka-oko (-1,0%/100 mT) oraz wzrokowych testów śledzenia (-3,1%/100 mT) (w miejscu, gdzie znajdowała się głowa osoby badanej indukcja magnetyczna wynosiła 0,6 T lub 1,0 T) (25). Powtórzone przez nich badania dla 7 T S-RM również wykazały działanie pól magnetycznych na widzenie i koordynację ręka-oko (26). Być może ten sam mechanizm, który powoduje zmiany neurobehawioralne odpowiada za obserwowane przez ten sam zespół badaczy objawy subiektywne ze strony centralnego układu nerwowego (zawroty głowy, nudności, problemy z koncentracją, pogorszenie pamięci, zmęczenie lub senność, wrażenia dzwonienia, zaburzenia snu) u elektroradiologów (27). Autorzy stwierdzają korelację częstości zgłaszanych dolegliwości z indukcją PMS.

Jak dotychczas nie przeprowadzono badań dotyczących innych skutków zdrowotnych, np. zachorowania na nowotwory u pracowników związanych

z diagnostyką RM, jednak najnowsze wyniki badań wskazują, że pola elektromagnetyczne o wartościach występujących przy S-RM mogą wpływać na procesy związane z kancerogennością. Simi i wsp. wykazali znaczący wzrost formacji mikrojąder po diagnostyce serca w 1,5 T S-RM (28). Podobnie Lee i wsp. wykazali wzrost liczby mikrojąder, momentu ogonowego w teście kometowym oraz aberracji chromosomalnych w ludzkich limfocytach poddanych *in vitro* 4 cyklom ekspozycji odpowiadającej obrazowaniu mózgu ludzkiego w 3 T S-RM. Wykazali oni również zależność analizowanych czynników od czasu ekspozycji limfocytów na pola związane ze skanowaniem próby (29). Autorzy tych prac podkreślają jednak, że obserwacje nie są zależne jedynie od PMS, a od całej procedury obrazowania obejmującej również magnetyczne pola gradientowe oraz pola elektromagnetyczne częstotliwości radiofalowych, które przy rutynowych badaniach oddziałują jedynie na pacjentów. Pracownicy mogą podlegać takim narażeniom np. przy śródoperacyjnym wykorzystaniu RM.

Mechanizmy działania biologicznego

O ile nie ma prac rozstrzygających, czy działanie PMS jest czynnikiem wywołującym wzrost zachorowań pracowników związanych z diagnostyką RM, o tyle liczne prace wskazują na jego wpływ na procesy związane z produkcją wolnych rodników, mogących uczestniczyć w procesach chorobowych, w tym nowotworowych. Należą do nich reakcje enzymatyczne. Wiele z nich przebiega z tworzeniem na etapach przejściowych par rodników. Do enzymów, których działanie przebiega w ten sposób, należą m.in. układ cytochromu P-450, lipoksygenazy i cyklooksygenazy (30). Można założyć, że reakcje te powinny być podatne na wpływ pola magnetycznego na skutek jego działania na stany spinowe par rodników (31). W ciągu ostatnich 20 lat zarówno opracowano modele teoretyczne wpływu pól magnetycznych na reakcje enzymatyczne (32,33), jak i potwierdzono doświadczalnie ten wpływ (34,35). Z obliczeń teoretycznych wynika, że nawet bardzo małe zmiany liczby rekombinujących par rodników (rzędu 0,5–2%) mogą nawet 100-krotnie zwiększyć tempo reakcji enzymatycznych (33). Omawiane badania dotyczące mechanizmów rodnikowego oddziaływania pola magnetycznego scharakteryzowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wolnorodnikowy model oddziaływania pola magnetostaticznego i jego potwierdzenie w badaniach biomedycznych
Table 2. Free radical pairs model of static magnetic field interaction and its confirmation in biomedical investigations

Lp. No.	Przedmiot lub warunki badań Subject or conditions of the study	Kluczowe wyniki Key results	Piśmiennictwo References
1	Teoria wpływu PMS na stany spinowe par rodników / Theory of SMF influence on radical pair spins correlation		McLauchlan, 1991 (31)
2	Teoria wpływu PMS na kinetykę reakcji enzymatycznych / Theory of SMF influence on the rate of enzymatic reactions		Vanag, 1984 (32)
3	Teoria wpływu PMS na rekombinację par rodników w reakcjach enzymatycznych / Theory of SMF influence on radical pair recombination in enzyme kinetics		Eichwald, 1996 (33)
4	100–150 mT	spadek parametru kinetyki zależnego od koenzymu B ₁₂ enzymu amoniakolizy kolaminy / decrease of kinetics parameter of B ₁₂ coenzyme dependent on ethanoloamine ammonia lyase	Harkins, 1994 (34)
5	0,05–175 mT	kształt krzywej dynamiki reakcji oscylacji układu peroksydaza–oksydaza potwierdza teorię wpływu PMS na pary rodników / peroxidase–oxidase oscillatory reaction dynamics exhibit a magnetic dosedependence consistent with the radical pair mechanism	Carson, 2000 (35)
6	20–45 mT	wzrost wytwarzania MDA w procesie peroksydacji lipidów w liposomach uzyskanych z lecytyny z jaj kurzych / increase of MDA produced by lipid peroxidation in egg lecithin	Aristarkhov, 1983 (36)
7	Momenty magnetyczne jąder/ Magnetic moments of the nuclei particles	wpływ efektu izotopu magnetycznego na rekombinację rodników nadtlenkowych / the magnetic isotope effect on superoxide recombination	Buchachenko, 1984 (37)
8	0–280 mT	przyspieszenie procesu peroksydacji lipidów w polach przekraczających 8 mT / lipid peroxidation accelerated in fields exceeding 8 mT	Lalo, 1994 (38)
9	25–150 mT	wzrost szybkości hemolizy ludzkich erytrocytów / accelerated hemolysis in human erythrocytes	Chignell, 1998 (39)
10	128 mT	wzrost poziomu LPO (mierzony poprzez MDA) oraz spadek aktywności SOD i katalazy w hipokampie szczura / LPO increase (measured as MDA) with SOD and catalase activity decrease in rat hippocampus	Amara, 2006 (40)
11	5 mT	wzrost peroksydacji lipidów w mikrosomach wątroby szczura / increase of lipid peroxidation in rat liver microsomes	Zmysłony, 1998 (41)
12	7 mT	wzrost uszkodzeń DNA w limfocytach krwi obwodowej szczura z dodatkiem jonów żelaza / increase of DNA damage in rat lymphocytes treated with iron cations	Zmysłony, 2000 (42)
13	5 mT	zmiany poziomu LPO (mierzone poprzez MDA i 4-HNE) oraz aktywności SOD i katalazy w narządzie słuchu myszy / changes of LPO level (measured as MDA + 4-HNE), SOD and catalase activities in mice cochlea	Politański, 2010 (43)
14	1,1 T	wzrost aberracji chromosomalnych po ekspozycji ludzkich limfocytów na PMS i promieniowanie cząsteczek alfa i protonów / increase of chromosome aberrations in human lymphocytes exposed to SMF and alpha particles and protons radiation	Takatsuji, 1989 (44)
15	10 T	wzrost liczby mikrojąder wywołanych promieniowaniem jonizującym 4 Gy w komórkach CHO-K1 / increase of micronuclei induced by 4 Gy radiation in CHO-K1 cells	Nakahara, 2002 (45)
16	2 i 5 T	wzrost częstości mutacji <i>Escherichia coli</i> WP2 <i>uvrA</i> pod wpływem sześciu substancji mutagennych działających łącznie z PMS / increased mutation rate of <i>Escherichia coli</i> WP2 <i>uvrA</i> under the influence of six known mutagenic substances and SMF	Ikehata, 1999 (46)
17	4,7 T	wzrost częstotliwość występowania zaindukowanych mitomycyną C komórek CHL zawierających mikrojądra / increased frequency of micronucleated CHL cells induced by mitomycin C	Okonogi, 1996 (47)
18	4,7 T	zwiększona częstotliwość występowania zaindukowanych wybranymi sześcioma mutagenami mikrojąder w erytrocytach myszy / increased rate of micronucleated mice erythrocytes induced by six chosen mutagens	Suzuki, 2006 (48)
19	5 T	indukowanie mutacji somatycznych przez PMS na skrzydłach <i>Drosophila melanogaster</i> stłumione przez podanie witaminy E / somatic mutations induced by SMF on wings of <i>Drosophila melanogaster</i> suppressed by vitamin E	Koana, 1997 (49)
20	0–14 T	zależność dawka–reakcja mutagennego działania PMS odpowiada okresowi trwania wolnych rodników w tym samym systemie testów / dose–response relationship of the mutagenic effect of SMF corresponds with the lifetime of free radicals in the same test system	Takashima, 2004 (50)

Wpływ PMS na łańcuchowe procesy rodnikowe, w tym na proces peroksydacji lipidów, znalazł potwierdzenie w kilku badaniach doświadczalnych. Pod koniec lat 70. Aristarchow i wsp. wykazali, że pole o indukcji 20–45 mT powoduje wzrost wytwarzania MDA w procesie peroksydacji lipidów — przy pomocy układu Fe^{2+} –kwas askorbinowy — w liposomach uzyskanych z lecytyny z jaj kurzych (36). W 1984 roku Buchachenko i wsp. wykazali wpływ efektu izotopu magnetycznego (działanie na reakcje rodnikowe momentów magnetycznych jąder) na rekombinację rodników nadtlenkowych (37). Istnienie tego zjawiska świadczy o podatności rekombinacji rodników nadtlenkowych na zewnętrzne pola magnetyczne. W 1994 roku Lalo i wsp. zbadali wpływ stałego pola magnetycznego 0–280 mT na kinetykę peroksydacji lipidów, indukowanej przez układ Fe^{2+} –kwas askorbinowy, w liposomach uzyskanych z 1,2-dioleoilfosfatydylocholino (ocenianej na podstawie oznaczania ubytku tlenu) (38). Stwierdzili oni przyspieszenie procesu peroksydacji lipidów w polach przekraczających 8 mT. Według autorów etapami podatnymi na działanie zewnętrznego pola magnetycznego są: reakcja inicjacji ($\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{O}_2^{\cdot -}$), wpływ pola spowodowany mechanizmem oddziaływania na sprzężenie spin orbita, reakcja redukcji żelaza (pod wpływem mechanizmu sprzężenia nadsubtelnego) i rekombinacja rodników nadtlenkowych (mechanizm relaksacyjny).

Jedną z nielicznych prac dotyczących biologicznego znaczenia wpływu PMS na proces peroksydacji lipidów jest praca Chignela i Sik (39). Wykazali oni znaczny (25%) wzrost szybkości hemolizy ludzkich erytrocytów pod wpływem pola magnetycznego o indukcji 25–150 mT. Reakcję hemolizy (fotohemolizy) w komórkach, zależną od stopnia peroksydacji lipidów w błonach komórkowych, wzbudzali, dodatkowo stosując czynnik fizyczny (promieniowanie UV) oraz chemiczny (lek ketoprofen).

W badaniach na mózgu szczura 30-dniowa ekspozycja na SPM o indukcji 128 mT wykazała wzrost poziomu LPO (mierzony poprzez MDA) oraz spadek aktywności SOD i katalazy w hipokampie szczura (40).

W dotychczas prowadzonych w Instytucie Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi badaniach wykazano, że słabe PMS (5–7 mT) wpływają na procesy oksydacyjne zachodzące w limfocytach krwi obwodowej szczura, mikrosomach wątroby szczura oraz w narządzie słuchu myszy (41–43).

Badania przeprowadzane na świetle wskazują również na synergistyczne działanie silnych PMS z innymi czynnikami chemicznymi lub fizycznymi, wzmacniające działanie kancerogenne tych czynników (44–48) — prawdopodobnie także poprzez mechanizm oddziaływania na pary rodników. Szczególnie praca Takatsuji i wsp. (44), która wykazuje wzrost aberracji chromosomalnych po ekspozycji ludzkich limfocytów na PMS o indukcji 1,1 T i promieniowanie cząsteczek alfa i protonów, oraz praca Nakahary i wsp. (45) wskazująca na wpływ 10 T PMS na wywołane 4 Gy promieniowaniem jonizującym uszkodzenia DNA (wzrost liczby mikrojąder) mogą budzić zaniepokojenie. Skanery rezonansu magnetycznego są bowiem stosowane powszechnie do diagnostyki, również po terapii nowotworowej promieniowaniem jonizującym, a wielu pracowników obsługuje zarówno badania wykonywane S-RM, jak i klasyczne badania rentgenowskie.

Koana i wsp. stwierdzili indukowanie mutacji somatycznych przez ekspozycje na 5 T PMS w testach SMART (Somatic Mutation and Recombination Test) na skrzydłach *Drosophila melanogaster*. Sugerują oni, że mutageneza ma podłoże wolnorodnikowe, ponieważ została stłumiona przez podanie witaminy E (49). Ten sam zespół stwierdził, że zależność dawka–reakcja mutagennego działania PMS z zakresu 0–14 T odpowiada okresowi trwania wolnych rodników w tym samym systemie testów (50).

CZY PMS MOGĄ WPŁYWAĆ NA ZDROWIE PRACOWNIKÓW

Jak wykazano w niniejszej pracy, parametry narażenia pracowników zatrudnionych przy S-RM zależą od konstrukcji i wyposażenia urządzenia oraz potrzeb i stanu zdrowia pacjenta, rodzaju badania i procedur pracy oraz wyposażenia technicznego poszczególnych S-RM. Na parametry te ma również wpływ świadomość natury zagrożeń i indywidualny sposób wykonywania pracy — determinują one odległość od magnesu, w jakiej wykonywane są poszczególne czynności. Typowym narażeniem pracowników, ustalonym na podstawie danych ekspozymetrycznych prezentowanych w niniejszej pracy, jest B_{max} równe 13–220 mT, B_{sr} równe 6–86 mT (ustalone na podstawie profili ekspozycyjnych odpowiadających typowym warunkom prowadzenia badań diagnostycznych w 1,5 T S-RM — narażenie na PMS przy analogicznych pracach wykonywanych przy 3 T S-RM może być wyższe o 20–30%).

Przytoczone dane literaturowe wskazują na możliwość biologicznego działania PMS o indukcjach przekraczających kilkadziesiąt mikrotesli. Wynika z tego, że mimo iż dotychczas nie ma badań wskazujących na występowanie u pracowników związanych z diagnostyką RM negatywnych skutków zdrowotnych, obecnie nie ma również podstaw do przyjęcia, że nie istnieją zagrożenia zdrowia dla pracowników przewlekle narażonych zawodowo na tak silne i złożone pola jak przy S-RM (4,51).

Wolnorodnikowe podłoże działania PMS — i to zarówno słabych (narażenie pracowników), jak i silnych (narażenie pacjentów i okazjonalnie pracowników) — jest o tyle niepokojące, że zwiększona liczba wolnych rodników, która może być przyczynkiem do wywołania przez S-RM negatywnych skutków zdrowotnych, może występować w wielu sytuacjach. Źródłami wolnych rodników mogą być np. promieniowanie jonizujące, leki ksenobiotyczne stosowane w terapii nowotworowej, stany zapalne organizmu czy choćby dym papierosowy.

Wszystkie te obserwacje nakazują daleko idącą ostrożność przy ocenie zagrożeń związanych z pracą w narażeniu na PMS skanerów RM. Mimo to w ostatnich latach niektórzy eksperci proponują znacznie zliberalizowane zalecenia dotyczące narażenia zawodowego na PMS. Takie jest też stanowisko ICNIRP, która w 2009 r. zaproponowała 10-krotne złagodzenie wymagań dotyczących ochrony pracowników przed zagrożeniami występującymi w czasie narażenia na PMS (ICNIRP-1994: dopuszczalne narażenie pracowników — 200 mT (52); ICNIRP-2009: dopuszczalne narażenie pracowników — 2 T (53)). Decyzja o ewentualnym przenoszeniu takiego trendu na grunt krajowych przepisów higienicznych dotyczących pracowników związanych z diagnostyką RM musi być jednak poprzedzona rzetelnymi badaniami epidemiologicznymi celem oceny zagrożeń zdrowia związanych z warunkami wykonywania takiej pracy. Problem, jaki stanowi eksploatacja części S-RM — przy których rutynowej obsłudze ze względu na ich dysfunkcje konstrukcyjne pracownicy szczególnie często zbliżają się do obudowy magnesu na odległość mniejszą niż 0,5 m i podlegają zwiększonym narażeniom na PMS — powinien zostać rozwiązany w procesie modernizacji wyposażenia placówek diagnostyki RM. Przy modernizacji urządzeń lub wprowadzaniu nowych wskazane jest eliminowanie z użycia S-RM o opisanej konstrukcji.

PODSUMOWANIE

1. Mimo braku danych dotyczących skutków zdrowotnych wieloletniego narażenia pracowników istnieje wiele danych wskazujących na biologiczne działanie PMS. Radykalne łagodzenie wymagań dotyczących narażenia głowy i tułowia pracowników jest więc przedwczesne, a ponadto nie jest warunkiem koniecznym rozwoju diagnostyki RM.
2. Istnieje pilna konieczność przeprowadzenia szeroko zakrojonych, międzynarodowych badań stanu zdrowia pracowników narażonych na pola elektromagnetyczne S-RM.
3. Ze względu na dominujące w czasie narażenia skutki oddziaływania PMS występujące w centralnym układzie nerwowym możliwą do rozważenia modyfikacją polskich wymagań bezpieczeństwa i higieny pracy powinno być łagodzenie wymagań dotyczących narażenia kończyn, bez istotnego łagodzenia wymagań dotyczących ochrony przed narażeniem głowy i tułowia.
4. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że spełnienie formalnych wymagań prawa pracy dotyczących narażenia pracowników na PMS jest możliwe przy właściwej organizacji stanowisk i procedur pracy oraz dzięki treningowi pracowników, prezentującemu sposoby asystowania pacjentowi bez narażania się na silne PMS. Wyniki badań ekspozymetrycznych mogą być wykorzystane w ramach takiego treningu, a także przy badaniach epidemiologicznych i regularnym nadzorze warunków narażenia na stanowiskach pracy.

PODZIĘKOWANIA

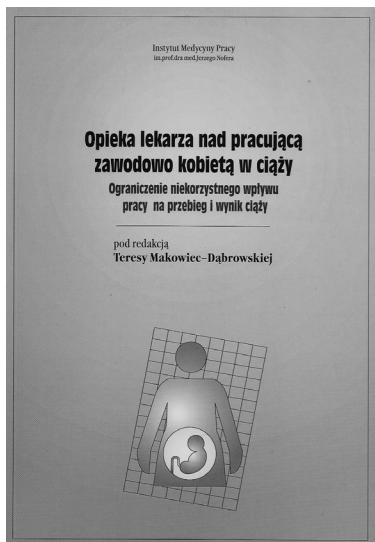
Autorzy dziękują pracownikom placówek diagnostyki rezonansu magnetycznego oraz Państwowej Inspekcji Sanitarnej za wszechstronną pomoc przy wykonaniu relacjonowanych badań.

PIŚMIENNICTWO

1. Markisz J.A., Aquilia M.: Technical magnetic resonance imaging. Appleton & Lange, Stamford 1996
2. Karpowicz J., Gryz K.: Ekspozycja pracowników obsługujących tomografy rezonansu magnetycznego w aspekcie narażenia zawodowego i bezpieczeństwa pracy. Inż. Biomed. Acta Biooptica Inf. Med. 2008;14(4):326–330
3. Karpowicz J., Hietanen M., Gryz K.: Occupational risk from static magnetic fields of MRI scanners. Environmentalist 2007;27(4):533–538

4. World Health Organization: Environmental Health Criteria 232, Static Fields. WHO, Geneva 2006
5. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR): Health Effects of Exposure to EMF. Opinion adopted at the 28th plenary on 19 January 2009, Brussels [cytowany 18 maja 2011]. Adres: http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_022.pdf
6. International Agency for Research on Cancer: Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields, IARC Monographs 80. IARC Press, Lyon 2002, s. 429
7. International Agency for Research on Cancer — World Health Organization: IARC classified radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release No 208. IARC, Lyon, 31 maja 2011
8. World Health Organization: Research Agenda for Static Fields. WHO, Geneva 2006
9. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2. Część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz–300 GHz. DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833
10. Karpowicz J., Gryz K.: Ekspozymetryczny profil narażenia zawodowego na pole magnetostatyczne przy tomografie rezonansu magnetycznego 1,5 T. Inż. Biomed. Acta Biooptica Inf. Med. 2010;16(3):261–264
11. Karpowicz J.: Ocena narażenia na prądy indukowane w ciele pracowników przebywających w polach magnetostatycznych w otoczeniu tomografów rezonansu magnetycznego. Inż. Biomed. Acta Biooptica Inf. Med. 2010;16(1):74–77
12. Gedliczka A.: Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej, CIOP, Warszawa 2001
13. Chaljub G., Kramer L.A., Johnson R.F. III, Johnson R.F. Jr, Singh H., Crow W.N.: Projectile cylinder accidents resulting from the presence of ferromagnetic nitrous oxide or oxygen tanks in the MR suite. Am. J. Roentgenol. 2001;177:27–30
14. Kangarlu A., Robitaille P.-M.: Biological effects and health implications in magnetic resonance imaging. Concepts Magn. Reson. 2000;12(5):321–359
15. Nyehnuis J.A., Kildishev A.V., Foster K.S., Graber G., Athey W.: Heating near implanted medical devices by the MRI RF-magnetic field. IEEE Trans. Magn. 1999;35:4133–4135
16. Dempsey M.F., Condon B., Hadley D.M.: Investigation of the factors responsible for burns during MRI. J. Magn. Reson. Imag. 2001;13:627–631
17. Wever R.: The effects of electric fields on circadian rhythmicity in men. Life Sci. Space Res. 1970;8:177–187
18. Zhang X., Li J.-F., Wu Q.-J., Li B., Jiang J.-C.: Effects of hypomagnetic field on noradrenergic activities in the brainstem of golden hamster. Bioelectromagnetics 2007;28:155–158
19. Gordon C., Berk M.: The effect of geomagnetic storms on suicide. S. Afr. Psychiatry Rev. 2003;6:24–27
20. Berk M., Dodd S., Henry M.: Do ambient electromagnetic fields affect behaviour? A demonstration of the relationship between geomagnetic storm activity and suicide. Bioelectromagnetics 2006;27:151–155
21. Oinuma S., Kubo Y., Otsuka K., Yamanaka T., Murakami S., Matsuoka O. i wsp. (ICEHRV Working Group): Graded response of heart rate variability, associated with an alteration of geomagnetic activity in a subarctic area. Biomed. Pharmacother. 2002;56:284–288
22. Dimitrova S., Stoilova I., Cholakov I.: Influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure. Bioelectromagnetics 2004;25(6):408–414
23. Crozier S., Liu F.: Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. Prog. Biophys. Mol. Biol. 2005;87:267–278
24. Kangarlu A., Robitaille P.M.L.: Biological effects and health implications in magnetic resonance imaging. Concepts Magn. Reson. 2000;12:321–359
25. De Vocht F., Stevens T., van Wendel-de-Joode B., Engels H., Kromhout H.: Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. J. Magn. Reson. Imaging 2006;23(3):291–297
26. De Vocht F., Stevens T., Glover P., Sunderland A., Gowland P., Kromhout H.: Cognitive effects of head-movements in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. Bioelectromagnetics 2007;28(4):247–255
27. De Vocht F.G., van Drooge H., Engels H., Kromhout H.: Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. J. Magn. Reson. Imaging 2006;23(2):197–204
28. Simi S., Ballardini M., Casella M., De Marchi D., Hartwig V., Giovannetti G. i wsp.: Is the genotoxic effect of magnetic resonance negligible? Low persistence of micronucleus frequency in lymphocytes of individuals after cardiac scan. Mutat. Res. 2008;645:39–43
29. Lee J.W., Kim M.S., Kim Y.J., Choi Y.J., Lee Y., Chung H.W.: Genotoxic effects of 3 T magnetic resonance imaging in cultured human lymphocytes. Bioelectromagnetics w druku 2011. DOI: 10.1002/bem.20664 [cytowany 13 kwietnia 2011]. Adres: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bem.20664/pdf>

30. World Health Organization: Environmental Health Criteria 69, Magnetic fields. WHO, Geneva 1987
31. McLaughlan K.A., Steiner U.E.: The spin correlated radical pair as a reaction intermediate. *Mol. Phys.* 1991;73(2):241–263
32. Vanag V.K., Kuznetsov A.N.: Kinetic analysis of the possible influence of a constant magnetic field on the rate of enzymatic reactions. *Biofizika* 1984;29:23–29
33. Eichwald C., Walleczek J.: Model for magnetic field effects on radical pair recombination in enzyme kinetics. *Biophys. J.* 1996;71:623–631
34. Harkins T.T., Grissom Ch.B.: Magnetic field effect on B₁₂ ethanoloamine ammonia lyase: evidence for a radical mechanism. *Science* 1994;263:958–960
35. Carson J.J.L., Walleczek J.: The peroxidase-oxidase oscillatory reaction dynamics exhibit a magnetic dose dependence consistent with the radical pair mechanism. W: 22nd Annual Meeting BEMS in cooperation with EBAA; 11–16 czerwiec, 2000; Munich, Niemcy. Abstract Book 2000; 25–26 [cytowany 18 maja 2011]. Adres: <http://www.bioelectromagnetics.org/doc/bems2000-abstracts.pdf>
36. Aristarkhov V.M., Klimenko L.L., Deev A.I., Ivankha E.V.: Effects of constant magnetic field on peroxide oxidation of lipid in phospholipid membranes. *Biofizika* 1983;5:800–806
37. Buchachenko A.L., Fedorov A.V., Yasina L.L., Galimov E.M.: The magnetic isotope effect and oxygen isotope selection in chain processes of polymer oxidation. *Chem. Phys. Lett.* 1984;103(5):405–407
38. Lalo U.V., Pankratov Y.O., Mikhailik O.M.: Steady magnetic fields effects on lipid peroxidation kinetics. *Redox Rep.* 1994;1(1):71–75
39. Chignell C.F., Sik R.H.: The effect of static magnetic fields on the photohemolysis in human erythrocytes by ketoprofen. *Photochem. Photobiol.* 1998;67(5):591–595
40. Amara S., Abdelmelek H., Garrel C., Guiraud P., Douki T., Ravanat J.L. i wsp.: Effects of subchronic exposure to static magnetic field on testicular function in rats. *Arch. Med. Res.* 2006;37(8):947–952
41. Zmysłony M., Jajte J., Rajkowska E., Szmigielski S.: Weak (5 mT) static magnetic field stimulates lipid peroxidation in isolated rat liver microsomes *in vitro*. *Electro Magnetobiol.* 1998;17(2):109–113
42. Zmysłony M., Palus J., Jajte J., Dziubałtowska E., Rajkowska E.: DNA damage in rat lymphocytes treated *in vitro* with iron cations and exposed to 7 mT magnetic fields (static or 50 Hz). *Mutat. Res.* 2000;453:89–96
43. Politański P., Rajkowska E., Pawlaczyk-Łuszczczyńska M., Dudarewicz A., Wiktorek-Smagur A., Śliwińska-Kowalska M. i wsp.: Static magnetic field affects oxidative stress in mouse cochlea. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 2010;23(4):377–384. DOI: 10.2478/v10001-010-0041-4
44. Takatsuji T., Sasaki M.S., Takekoshi H.: Effect of static magnetic field on the induction of chromosome aberrations by 4.9 MeV protons and 23 MeV alpha particles. *J. Rad. Res.* 1989;30:238–246
45. Nakahara T., Yaguchi H., Yoshida M., Miyakoshi J.: Effects of exposure of CHO-K1 cells to a 10-T static magnetic field. *Radiology* 2002;224:817–822
46. Ikehata M., Koana T., Suzuki Y., Simizu H., Nakagawa M.: Mutagenicity and co-mutagenicity of static magnetic fields detected by bacterial mutation assay. *Mutat. Res.* 1999;427:147–156
47. Okonogi H., Nakagawa M., Tsuji Y.: The effects of a 4.7 tesla static magnetic field on the frequency of micronucleated cells induced by mitomycin C. *Tohoku J. Exp. Med.* 1996;180:209–215
48. Suzuki Y., Toama Y., Miyakoshi Y., Ikehata M., Yoshioaka H., Shimizu H.: Effect of static magnetic field on the induction of micronuclei by some mutagens. *Environ. Health Prev. Med.* 2006;11:228–232
49. Koana T., Okada M.O., Ikehata M., Nakagawa M.: Increase in the mitotic recombination frequency in *Drosophila melanogaster* by magnetic field exposure and its suppression by vitamin E supplement. *Mutat. Res.* 1997;373:55–60
50. Takashima Y., Miyakoshi J.U., Ikehata M., Iwasaka M., Ueno S., Koana T.: Genotoxic effect of strong static magnetic fields in DNA-repair defective mutation of *Drosophila melanogaster*. *J. Radiat. Res.* 2004;45:393–397
51. Prato F.S., Thomas A.W., Legros A., Robertson J.A., Modolo J., Stodilka R.Z. i wsp.: MRI safety not scientifically Proven. *Science* 2010;328:568–569
52. ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 1994;66(1):100–106
53. ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines on limit of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 2009;96(4): 404–514



PUBLIKACJE

INSTYTUTU MEDYCYNY PRACY IM. PROF. J. NOFERA W ŁODZI

OPIEKA LEKARZA NAD PRACUJĄCĄ ZAWODOWO Kobietą W CIĄŻY. OGRANICZENIE NIEKORZYSTNEGO WPŁYWU PRACY NA PRZEBIEG I WYNIKI CIĄŻY

pod redakcją
Teresy Makowiec-Dąbrowskiej

ISBN 83-86052-58-9

Cena: 15,75 zł

Ciąża jest stanem fizjologicznym, lecz jest to okres, w którym organizm kobiety może reagować w zmieniony sposób na niektóre czynniki występujące w środowisku, w tym i w środowisku pracy, lub na niektóre obciążenia, w tym również obciążenia związane z pracą zawodową. Wynika to ze zmian, jakie w związku z ciążą zachodzą w organizmie kobiety, ukierunkowanych na zapewnienie warunków rozwoju płodu i późniejszego porodu. Czynniki występujące w pracy zawodowej (niektóre czynniki chemiczne i fizyczne, wielkość wysiłku fizycznego, pozycja ciała, przenoszenie ciężarów, tempo pracy, obciążenie psychiczne) mogą wywierać negatywny wpływ na przebieg i wynik ciąży. Ten negatywny wpływ przejawiać się może wystąpieniem poronienia samoistnego, wewnątrzmacicznej śmierci płodu lub przedwczesnym zakończeniem ciąży (poród przedwczesny) czy też zaburzeniami rozwoju płodu (wady wrodzone, hipotrofia).

Publikacja ma na celu przedstawienie czynników występujących w środowisku pracy oraz niektórych czynników środowiskowych, a także rodzajów pracy i obciążeń związanych z jej wykonywaniem, które mogą mieć negatywny wpływ na reprodukcję, oraz wskazanie zakresu dopuszczalnych (lub jeszcze dobrze tolerowanych) obciążeń dla kobiet w ciąży. Celem opracowania jest poszerzenie wiadomości o zagadnienia ściśle związane z pracą zawodową i niektórymi czynnikami środowiskowymi, które tu zgromadzone mogą ułatwić lekarzom sprawowanie opieki profilaktycznej nad pracującą zawodowo kobietą w ciąży.

ZAMÓWIENIA

Zamówień można dokonywać w formie przedpłaty (zamówione pozycje wysyłamy po zaksięgowaniu przelewu) lub za zaliczeniem pocztowym (zamawiający płaci za książkę i przesyłkę przy odbiorze).

Oficyna Wydawnicza (księgarnia)

Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. J. Nofera
ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź
tel./faks 42 631 47 19
e-mail: ow@imp.lodz.pl

Księgarnia internetowa

<http://www.imp.lodz.pl/ksiegarnia>

Konto nr 23 1240 3028 1111 0000 2822 2749, Bank Pekao SA, II O/Łódź
(W przelewie prosimy podać tytuł zamawianej pozycji i NIP).