

ZDROWOTNE SKUTKI EKSPOZYCJI NA STAŁE POLE MAGNETYCZNE – PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA

HEALTH EFFECTS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELD –
A REVIEW OF LITERATURE

Marek Zmyślony, Piotr Politański

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland
Zakład Ochrony Radiologicznej / Department of Radiological Protection

STRESZCZENIE

Autorzy pracy omawiają skutki narażenia na stałe pole magnetyczne (SPM) na podstawie doniesień z piśmiennictwa. Systematycznym przeglądem zostały objęte badania zarówno z udziałem ludzi, jak i prowadzone na zwierzętach. Dokonano analizy różnych potencjalnych skutków działania SPM, np. kancerogennego, a także jego wpływu na zaburzenia rozrodu, oddziaływania na układ nerwowy, układ krążenia czy na zaburzenia metaboliczne. Opiszano również możliwe efekty biofizyczne i biologiczne oddziaływania SPM. Med. Pr. 2019;70(1)

Słowa kluczowe: zaburzenia metaboliczne, zaburzenia rozrodu, kancerogeny, układ nerwowy, stałe pole magnetyczne, układ krążenia

ABSTRACT

The authors discuss the effects of static magnetic field (SMF) exposure based on reviewed literature reports. The systematic review covered both research carried out directly with people as well as studies with animals. A review was carried out in terms of various potential effects: carcinogenic effects, reproductive and metabolic disorders or the influence of SMF on the nervous and circulatory system. The possible biophysical and biological effects of the SMF were also described. Med Pr. 2019;70(1)

Key words: metabolic disorders, reproductive disorders, carcinogens, nervous system, static magnetic field, circulatory system

Autor do korespondencji / Corresponding author: Piotr Politański, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera,
Zakład Ochrony Radiologicznej, ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: piotr.politanski@imp.lodz.pl
Nadesłano: 13 czerwca 2018, zatwierdzono: 28 sierpnia 2018

WSTĘP

Zewnętrzne pole elektromagnetyczne (PEM), oddziałując na człowieka, może zaburzać jego procesy życiowe poprzez przekazanie mu przenoszonej przez siebie energii. Wiedza na temat skutków zdrowotnych tego wpływu jest jednak wciąż niewielka. Powszechnie uznany jest natomiast ich podział na utrwalone skutki odległe (z których najważniejsze to choroby) oraz bezpośrednie skutki biofizyczne. Ostatnie z wymienio-

nych, bezpośrednio powstałe w organizmie człowieka podczas jego przebywania w polu elektromagnetycznym, obejmują skutki termiczne, takie jak ogrzanie tkanki przez pochłoniętą w niej energię PEM, i nietermiczne, np. pobudzenie mięśni, nerwów lub narządów zmysłów. O ile nie ma wątpliwości co do występowania bezpośrednich skutków biofizycznych, o tyle pytania o zdrowotne skutki odległe wciąż pozostają bez odpowiedzi. Sytuacja ta ma bezpośredni związek z formą i kształtem przepisów ochronnych przed zagrożenia-

Finansowanie / Funding: zadanie finansowane ze środków Narodowego Programu Zdrowia na lata 2016–2020 [projekt nr 6/4/3.2a/ /NPZ/2017/312/606 pt. „Badanie i ocena wpływu jakości środowiska na stan zdrowia, w tym środowiska służby żołnierzy zawodowych i funkcjonariuszy, z uwzględnieniem następujących komponentów środowiska i elementów z nim powiązanych: powietrza, odpadów i ścieków odprowadzanych do środowiska (w tym farmaceutyki i substancje endokrynopodobne), wody przeznaczonej do spożycia oraz wykonywanej do celów rekreacyjnych, hałasu, promieniowania elektromagnetycznego, zanieczyszczenia związkami chemicznymi gleb wykorzystywanych rolniczo, klimatu (w tym susze i zjawiska ekstremalne, choroby wektorowe, osuwiska ziemi, powodzie i podtopienia) i działań związanych z adaptacją do jego zmian; w ramach działania 3.2, „Pozostałe zadania wspierające. Badania naukowe” celu operacyjnego 4. „Ograniczenie ryzyka zdrowotnego wynikającego z zagrożeń fizycznych, chemicznych i biologicznych w środowisku zewnętrznym, miejscu pracy, zamieszkania, rekreacji oraz nauki”, kierownik projektu: prof. dr hab. Marek Zmyślony.

mi związanymi z PEM. Przykładem jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE [1]. Jej twórcy w preambule piszą: „Celem niniejszej dyrektywy jest uwzględnienie wszystkich znanych bezpośrednich skutków biofizycznych i skutków pośrednich, wywoływanych przez pola elektromagnetyczne, nie tylko po to, aby zapewnić zdrowie i bezpieczeństwo każdego indywidualnego pracownika, lecz także stworzyć minimalne podstawy ochrony wszystkich pracowników w Unii, przy jednoczesnym ograniczeniu ewentualnych zakłóceń konkurencji. Niniejsza dyrektywa nie dotyczy sugerowanych skutków odległych narażenia na pola elektromagnetyczne, ponieważ nie ma obecnie ugruntowanych dowodów naukowych istnienia związku przyczynowego w tym zakresie” [1]. Wielu specjalistów uważa takie podejście do problemu ochrony zdrowia osób ekspozowanych na PEM za bardzo kontrowersyjne, ponieważ istnieją i pojawiają się coraz liczniejsze informacje na temat skutków odległych. Dlatego konieczne są ich dalsze intensywne badania, by móc jak najszybciej skorzystać z teżej preambuły: „Jednak w przypadku pojawienia się takich ugruntowanych dowodów naukowych Komisja powinna rozważyć najbardziej odpowiednie środki służące uwzględnieniu tych skutków i w drodze sprawozdania dotyczącego praktycznego wdrażania niniejszej dyrektywy informować o nich Parlament Europejski i Radę. Wykonując ten obowiązek, Komisja powinna wziąć pod uwagę nie tylko odpowiednie informacje otrzymane od państw członkowskich, ale również najnowsze dostępne wyniki badań i nową wiedzę naukową wynikającą z danych w tej dziedzinie” [1].

Przepisy polskie są implementacją Dyrektywy 2013/35/UE [1], dlatego także w Polsce konieczne jest prowadzenie badań nad skutkami odległymi, które pozwolą zapewnić jak najlepszą ochronę osobom zawodowo ekspozowanym na PEM. W roku 2017 na zlecenie Ministerstwa Zdrowia, w ramach Narodowego Programu Zdrowia (4 cel operacyjny: „Ograniczenie ryzyka zdrowotnego wynikającego z zagrożeń fizycznych, chemicznych i biologicznych w środowisku zewnętrznym, miejscu pracy, zamieszkania, rekreacji oraz nauki”) Instytut Medycyny Pracy w Łodzi podjął prace nad bada-

niem wpływu PEM na zdrowie pracowników zakładów diagnostyki obrazowej.

Pracownicy zakładów diagnostyki obrazowej, w których wykorzystywane są urządzenia rezonansu magnetycznego (MRI), to jedna z grup zawodowych szczególnie narażonych na PEM. Urządzenia MRI, wprowadzone do użytku w Polsce zaledwie 25 lat temu, są coraz powszechniej stosowane. W roku 2008 w kraju funkcjonowało ok. 100 skanerów MRI. Obecnie Narodowy Fundusz Zdrowia (NFZ) realizuje na podstawie podpisanych kontraktów świadczenia w 251 zakładach diagnostyki obrazowej wyposażonych w MRI. Ponadto szacuje się, że placówki, które nie podpisały kontraktów z NFZ, dysponują dodatkowo ok. 50 skanerami tego typu. Specyfika konstrukcji urządzeń MRI powoduje, że stałe pole magnetyczne (SPM) jest wokół nich obecne bez przerwy, a nie tylko podczas zabiegów. Dlatego zatrudniony przy MRI personel (z reguły co najmniej kilka osób) podlega narażeniu na takie pole nie tylko w trakcie badań, ale również na przykład podczas przygotowywania pacjenta do badania czy prac porządkowych w pomieszczeniu z urządzeniem. W związku z tym SPM wydaje się tym czynnikiem, który w pierwszej kolejności powinien być rozważany jako przyczyna ewentualnych negatywnych skutków zdrowotnych u pracowników zakładów diagnostyki obrazowej wyposażonych w MRI.

W niniejszym raporcie przedstawiono wyniki przeglądu literatury dotyczącej skutków zdrowotnych, bezpośrednich skutków biofizycznych oraz skutków biologicznych ekspozycji na SPM, charakteryzujących się różnymi wartościami indukcji magnetycznej (spotykanych zarówno w pracowniach MRI, jak i innych).

METODY PRZEGLĄDU

W artykule uwzględniono prace w językach polskim i angielskim, wyłonione na podstawie przeglądu baz PubMed i Web of Science przy użyciu słów kluczowych: *static magnetic field* i *health effects* oraz analizy piśmiennictwa poświęconego rozważanemu zagadnieniu.

WYNIKI PRZEGLĄDU

Efekty zdrowotne

Mimo że stałe pola magnetyczne spośród wszystkich pól elektromagnetycznych znane są człowiekowi najdłużej, to niewiele jest badań epidemiologicznych dotyczących ich wpływu na zdrowie. Spowodowane jest to

zapewne stosunkowo nieliczną grupą osób zawodowo na nie ekspozowanych. Oprócz personelu obsługującego MRI do grupy tej należą zatrudnieni w zakładach produkcji aluminium, elektrolizy NaCl, pracownicy kolei obsługujący urządzenia zasilane prądem stałym i niektórzy spawacze. Podlegają oni narażeniu na pola o indukcji 2–15 mT (w sposób ciągły), maksymalnie na 60 mT [2–5]. Tymczasem ekspozycja personelu pracowni MRI na SPM, zależna od wielu istotnych czynników (m.in. od typu MRI i jego indukcji znamionowej, wyposażenia technicznego pracowni, rodzaju wykonywanych procedur), może wahać się od indukcji rzędu 0,05 mT (w pomieszczeniu obrazowania) przez 3–150 mT (podczas koniecznych czynności wykonywanych w pomieszczeniu MRI) aż po znamionową indukcję rezonansu 0,2–7 T (występującą we wnętrzu cewki elektromagnesu) [6]. W rozdziale tym zostaną omówione obserwowane zdrowotne efekty odległe ekspozycji na SPM.

Działanie kancerogenne

Badania u ludzi

Najwięcej kontrowersji i zainteresowania budzi kancerogenne działanie SPM – właściwie należałoby napisać „budziło”, gdyż wszystkie znane badania epidemiologiczne przeprowadzono jeszcze w ubiegłym wieku. Niestety dotąd nie pojawiły się badania pracowników zatrudnionych przy MRI, a najwięcej dotychczasowych dotyczyło pracowników zakładów produkcji aluminium. Ich wyniki wskazywały na występowanie wielu różnych nowotworów [7,8], przede wszystkim płuc i pęcherza moczowego [9], a rzadziej białaczek i nowotworów mózgu [10–12]. Warto zauważyć, że w badaniach tych rzadko wydzielano SPM jako „samodzielny” czynnik szkodliwy – w tych, w których tego dokonano, nie stwierdzono związku ekspozycji na SPM ze wzrostem ryzyka zachorowania na nowotwory [9,10]. Należy pamiętać, że w fabrykach aluminium pracownicy ekspozowani są na wiele czynników kancerogennych, w tym na wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, fluorki, dwutlenek siarki i ciepło.

Badania kancerogenności prowadzono również wśród pracowników zakładów elektrolizy NaCl – w żadnym z nich nie stwierdzono związku ekspozycji na SPM z ryzykiem zachorowania na nowotwory [5].

Istnieje wiele badań dotyczących zachorowalności na nowotwory u spawaczy, ale w żadnym z nich nie analizowano wpływu SPM, które wydaje się być najmniej istotnym ze wszystkich ewentualnie szkodliwych czynników występujących na tych stanowiskach pracy.

Badania na zwierzętach

Wykonano niewiele badań dotyczących działania SPM na rozwój nowotworów u zwierząt i dały one w większości [13,14] wynik negatywny – w jednym stwierdzono nawet terapeutyczny wpływ na wszczepiony nowotwór [15]. Najwięcej badań dotyczy skojarzonego działania SPM i czynników chemicznych, zarówno kancerogennych, jak i leków. W ich zdecydowanej większości zauważano istotny pozytywny wpływ ekspozycji na SPM na działanie antynowotworowe [16–21]. Wydaje się, że wyniki badań na zwierzętach potwierdzają postulowaną niżej hipotezę o wpływie SPM na procesy oksydacyjne.

Zaburzenia rozrodu

Badania u ludzi

Innym szkodliwym efektem związanym z ekspozycją na PEM są zaburzenia rozrodu. Największe badanie dotyczące tego wpływu SPM przeprowadzono w latach 90. ubiegłego wieku w USA (ankieta dotycząca mieszkowania i reprodukcji oraz potencjalnych czynników zakłócających) wśród prawie 2000 pracowników przebywających przy MRI [22]. Wyniki badania nie wykazały żadnego znaczącego zwiększenia niepożądanych efektów rozrodczych. Można tu również wspomnieć (choć nie dotyczy to przedmiotu tego przeglądu, czyli wpływu SPM na zdrowie osób ekspozowanych zawodowo), że także badania potomstwa kobiet, które zostały poddane co najmniej 5 badaniom MRI podczas ciąży, nie wykazały żadnego wpływu ekspozycji na SPM na wcześniejsze rozwiązanie czy zdrowie noworodka [23].

Podobne negatywne wyniki otrzymano po przeprowadzeniu badań u pracowników zakładów produkcji aluminium [24].

Badania na zwierzętach

Wyniki badań na zwierzętach również nie dały odpowiedzi na pytanie o prawdziwość hipotezy negatywnego wpływu ekspozycji na SPM na proces rozrodu, chociaż większość analiz wskazuje na brak takich efektów. W badaniach płodności Tablado i wsp. [25] nie stwierdzili wpływu przewlekłej ekspozycji na SPM (ekspozycja ciężarnych myszy na SPM o indukcji 0,5–0,7 T od 7 dnia ciąży do porodu) na plemniki męskiego potomstwa ekspozowanych zwierząt. Z kolei Narra i wsp. [26] oraz Monfarad i wsp. [27] zaobserwowali niewielkie, ale istotne statystycznie, zmiany w spermatogenezie u myszy poddanych 30-minutowej ekspozycji na SPM o indukcji 1,5 T.

Nie ma również zgodności w przypadku wyników badań wpływu SPM na rozwój embrionalny. Można

znaleźć szereg prac wskazujących na negatywne działanie SPM. Bekhite i wsp. [28] stwierdzili, że prenatalna ekspozycja myszy na SPM o indukcji 10 mT może zaburzać rozwój embrionalny. Espinar i wsp. [29] wykazali, że ekspozycja płodów myszy na SPM o indukcji 20 mT (6–13 lub 6–17 dzień ciąży) powoduje nieodwracalne efekty rozwojowe, a Levin i wsp. [30] zauważyli wpływ SPM o indukcjach 10–100 mT na rozwój embrionalny jeźowców. Jednak w innych badaniach nie stwierdzono występowania efektu teratogennego, np. Ueno i wsp. [31] nie zaobserwowali go dla embrionów zaby ekspozowanych na SPM o indukcjach 40 nT–8 T, a Zahedi i wsp. [32] – dla embrionów myszy ekspozowanych na SPM do 1,5 T. Wiele badań nad zdrowiem reprodukcyjnym dotyczy zwierząt poddawanych takiej ekspozycji, jakiej podlegają pacjenci w skanerach MRI – choć ich wyniki są interesujące, nie stanowią jednak, jak uważają autorzy, przedmiotu niniejszej pracy.

Wpływ na układ nerwowy

Badania u ludzi

Układ nerwowy jest powszechnie uznawany za układ krytyczny z punktu widzenia oddziaływania PEM. Istnieją liczne badania dotyczące oddziaływania SPM na układ nerwowy – w większości opisują one jednak efekty ostre, które zostaną omówione w dalszej części pracy. W literaturze można znaleźć również dane wskazujące na tak odległe skutki wpływu SPM, jak zdrowie psychiczne. Dla przykładu Ghotbi i wsp. [33] stwierdzili, że stan zdrowia psychicznego pracowników narażonych na SPM (100 osób) o średniej wartości 2,5 mT był istotnie statystycznie gorszy niż pracowników nieekspozowanych. Zdiagnozowano u nich istotnie wyższy poziom lęków, zaburzeń snu ($p = 0,001$) i depresji ($p = 0,007$).

Badania na zwierzętach

W literaturze można znaleźć opisy wielu badań dotyczących wpływu SPM na zachowanie zwierząt. Wyniki tych badań są niejednorodne, zwłaszcza w zakresie indukcji spotykanych w praktyce. W swojej pracy Levine i wsp. [34] zaobserwowali zaburzenia orientacji przestrzennej szczurów poddanych wcześniej ekspozycji na SPM o indukcji 2 T przez 100 min (były one niestety również poddane ekspozycji na pola gradientowe), a Trzeciak i wsp. [35] stwierdzili u szczurów narażonych na 0,49 T przez 2 godz. dziennie przez 20 dni zmniejszoną „drażliwość”, tj. reakcję na dotyk. Nie odnotowali natomiast wpływu takiej ekspozycji na zachowanie zwierząt badanych testem otwartego pola oraz na ich

aktywność lokomotoryczną. Z kolei Nakagawa i Matsuuda [36] zanotowali, że szczury ekspozowane na SPM o indukcji 0,6 T przez kilka tygodni (5 i 7 tyg.) wykazywały pogorszenie wyników w 2 testach unikania. Hong i wsp. [37] u szczurów poddawanych ekspozycji na SPM o wartości 0,5 T przez 14 dni po urodzeniu nie stwierdzili gorszych wyników w pokonywaniu labiryntu.

Wpływ na układ krążenia

Badania u ludzi

Układ krążenia uważany jest za szczególnie wrażliwy na działanie pól PEM, dlatego badania wpływu SPM nań trwają już kilkadziesiąt lat. Jak dotąd jednak ograniczają się do analizowania skutków ostrych – autorzy nie znaleźli żadnych doniesień o badaniach zdrowotnych skutków odległych.

Badania na zwierzętach

Kontrowersje wśród różnych grup badawczych budzi hipoteza o wpływie SPM na ciśnienie. W pracach Tenforde i wsp. [38], Kangarlu i wsp. [39] oraz Chakeres i wsp. [40] nie sygnalizuje się takiego wpływu i to w bardzo szerokim zakresie indukcji (aż do 8 T). W innych pracach wpływ na ciśnienie jest jednak obserwowany, np. Tasic i wsp. [41] stwierdzili pozytywne działanie długotrwałej (30 dni) ekspozycji na SPM o indukcji 16 mT na regulację neurowegetatywną w nadciśnieniu tętniczym, a Gmitrov [42] zauważył znaczący efekt rozszerzający naczynia wieńcowe pod wpływem lokalnej 40-minutowej ekspozycji na SPM o indukcji 0,25–0,35 T. Autorzy tych prac podkreślają, że obserwowane efekty mogą być wykorzystywane w celach terapeutycznych.

Wpływ na zaburzenia metaboliczne

Badania u ludzi

Podobna jak przypadku stanu wiedzy o wpływie SPM na ciśnienie sytuacja dotyczy badań nad związkiem SPM i zaburzeń metabolicznych. Mimo że stwierdza się je u zwierząt, dotychczas nie prowadzono ich z udziałem ludzi.

Badania na zwierzętach

Działanie oksydacyjne SPM (o którym będzie mowa niżej) może mieć wiele efektów związanych np. z transportem biomolekuł. Jednym z nich może być negatywny wpływ na poziom witaminy D transportowanej przez wiążące ją białko (*vitamin D binding protein* – DBP). Skutek taki został zaobserwowany u szczurów poddanych ekspozycji na SPM występujące w otoczeniu skanerów MRI. Gungor i wsp. [43] stwierdzili ponadto

zdecydowane pogorszenie parametrów wskazujących na rozwój osteoporozy u zwierząt. Również inni badacze, np. Zhang i wsp. [44], zaobserwowali wpływ SPM na stan kości – w cyklu swoich prac raportują zależne od wartości indukcji różnicowanie osteoklastów (różne efekty dla indukcji 500 nT, 0,2 T i 16 T). Zainteresowanie oddziaływaniem SPM na kości jest oczywiście związane z możliwością wykorzystania go w terapii. Jednak ze względu na to, że jest to odrębny, bardzo obszerny temat, w tym przeglądzie został przez autorów pominięty.

Innym efektem oddziaływania SPM może być jego wpływ na metabolizm zachodzący np. w mięśniach, związany z działaniem SPM na peroksydację lipidów skutkującą m.in. zaburzeniami transportu jonowego. Elferchichi i wsp. [45] zaobserwowali znaczne pogorszenie parametrów metabolicznych u szczurów poddanych ekspozycji na SPM o indukcji 128 mT (1 godz./dzień przez 15 dni). Autorzy przypuszczają, że główną przyczyną zmian komórek po inkubacji w zewnętrznym SPM jest podwyższenie stężenia wolnych rodników, co prowadzi do niestabilności poziomu glukozy i uwalniania insuliny. Ponadto na podstawie dostępnych danych stwierdzono, że ekspozycja na SPM zmienia poziomy witamin A, C, D i E w osoczu, co może prowadzić do zaburzenia homeostazy glukozy i uwalniania insuliny [46]. W innym badaniu [47], w którym eksponowano myszy na SPM (niejednorodne w zakresie 2,8–476,7 mT) przez 12 tygodni, stwierdzono jednak efekt odwrotny – pod wpływem ekspozycji zmniejszał się poziom glukozy.

Efekty biofizyczne i biologiczne

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione efekty natychmiastowego działania SPM: zarówno te, które stały się podstawą dyrektywy Unii Europejskiej, jak i mogące mieć powiązanie z ewentualnymi skutkami zdrowotnymi.

Działanie genotoksyczne

Niestety w literaturze przedmiotu nie znaleziono badań *in vivo* nad ewentualnym działaniem genotoksycznym SPM u osób eksponowanych zawodowo. Istnieją doniesienia dotyczące tego zagadnienia u pacjentów poddawanych badaniom MRI. Wyniki tych badań nie są spójne, ale wszyscy autorzy, np. Vijayalaxmi i wsp. [48], zwracają uwagę na to, że nie wiadomo, które z pól (SPM, pole gradientowe czy radiofalowe) można uznać za przyczynę obserwowanych efektów.

Również dane z badań *in vitro* są niespójne. W większości starszych analiz i niektórych nowszych hipoteza

o genotoksycznym działaniu SPM nie znajduje potwierdzenia. Nie stwierdzono występowania:

- uszkodzeń DNA – Raylman i wsp. [49] zbadali wpływ 64-godzinnej ekspozycji na SPM o indukcji 7 T na 3 ludzkie nowotworowe linie komórkowe, HTB 63 (czerniak), HTB 77 IP3 (rak jajnika) i CCL 86 (chłoniak: komórki Raji). Chociaż stwierdzono zmniejszenie liczby żywych komórek, nie zaobserwowano wzrostu liczby uszkodzeń DNA ani zaburzeń w cyklu komórkowym. Romeo i wsp. [50] nie zauważyli ich przy badaniu linii komórkowych MRC-5 eksponowanych przez 24 godz. na SPM o indukcji 370 mT. Z kolei Amara i wsp. [51] nie stwierdzili uszkodzeń DNA w komórkach THP1 poddanej 3-godzinnej ekspozycji na SPM o indukcji 250 mT. Z punktu widzenia autorów szczególnie interesujące są prace wykonywane dla SPM emitowane przez skanery MRI. Szerencsi i wsp. [52] zauważyli, że 22-, 45-, 67- i 89-minutowe narażenie na SPM skanerów 3 T (podczas wykonywania badań) nie powodowało wzrostu liczby uszkodzeń DNA w limfocytach krwi obwodowej człowieka. Taki sam wynik uzyskali Reddig i wsp. [53], którzy poddawali hodowle limfocytów 1-godzinnej ekspozycji na PEM emitowane przez skaner 7 T. Również Schroeiber i wsp. [54] nie stwierdzili zwiększenia liczby uszkodzeń DNA w teście Ames (bakterie *Salmonella typhimurium*) przy 1-godzinnej ekspozycji na SPM (oraz innych PEM emitowanych podczas badania) w skanerach 1,5 T i 7,2 T;
 - aberracji chromosomowych i wymiany chromatyd siostrzanych – np. Cooke i Morris [55] nie stwierdzili ich po ekspozycji na SPM o indukcji 0,5 T i 1 T, podobnie jak Peteiro-Cartelle i Cabezas-Cerrato [56], którzy eksponowali kultury limfocytów (3 godz. na pole 45 mT lub przez 72 godz. lub 96 godz. na pole 125 mT);
 - indukcji transformacji – np. w pracy Gearda i wsp. [57], którzy wykonywali badania na komórkach myszy C3H 10T1/2 poddawanych 17-godzinnej ekspozycji na pola emitowane przez skaner 2,7 T;
 - mutacji – np. Ruiz-Gómez i wsp. [58] nie zaobserwowali ich po 1- lub 72-godzinnej ekspozycji drożdży *Saccharomyces cerevisiae* na SPM o indukcjach 0,35 mT, 1,4 mT i 2,45 mT;
 - tworzenia mikrojąder – np. we wspomnianych wcześniej pracach Szerencsi i wsp. [52] czy Amary i wsp. [51].
- Istnieją jednak prace potwierdzające genotoksyczne działanie SPM. Na przykład Koana i wsp. [59] w swoich

badaniach przy użyciu *Drosophila melanogaster* stwierdzili, że 24-godzinna ekspozycja na SPM o indukcji 5 T zwiększyła działanie genotoksyczne endogennie wytwarzanych wolnych rodników, a Suzuki i wsp. [60] zaobserwowali wzrost liczby mikrojąder w komórkach szpiku kostnego myszy poddanych przez 48 godz. i 72 godz. ekspozycji na pole 3 T oraz przez 24 godz., 48 godz. i 72 godz. na pole 4,7 T. Ekspozując kultury ludzkich limfocytów w warunkach ekspozycji na PEM emitowane przez skanery 3 T, Lee i wsp. [61] stwierdzili zależny od czasu ekspozycji wzrost częstotliwości uszkodzeń jednoniciowych DNA oraz zwiększenie częstotliwości aberracji chromosomowych i liczby mikrojąder. Potęza i wsp. [62] postulują na podstawie swoich badań przy użyciu komórek śródbłonkowych ludzkiej pępowiny, poddanych przez 4 godz., 24 godz., 48 godz. i 72 godz. ekspozycji na SPM o indukcji 300 mT, przejściowe uszkodzenia DNA. Z kolei Zhang i wsp. [63] zauważyli zwiększoną liczbę mutacji pod wpływem 24-godzinnej ekspozycji *Escherichia coli* na SPM o indukcji 9 T.

Nie do końca jasny jest również problem współdziałania SPM z innymi czynnikami genotoksycznymi. Wyniki większości badań nie wskazują na taki efekt. Kale i Baum [64] po zastosowaniu testu *Drosophila melanogaster* nie zauważyli wpływu chronicznej (7 dni) ekspozycji na SPM o indukcji 3,7 T na spermatydy i spermatocyty napromieniowywane promieniowaniem neutronowym plus gamma o dawce pochłoniętej 3 Gy. Kimura i wsp. [65] nie zaobserwowali wpływu ekspozycji silnego SPM (o indukcjach 3 T i 5 T) na ekspresję genów i uszkodzenia DNA w *Caenorhabditis elegans* poddanych wcześniej ekspozycji na promieniowanie kobaltu-60 (100 Gy przez 3 godz.). Znane są jednak doniesienia potwierdzające takie współdziałanie. Takatsuji i wsp. [66] stwierdzili, że średnia częstotliwość dicentratorów w limfocytach krwi obwodowej człowieka ekspozowanych jednocześnie na SPM o indukcji 1 T i promieniowanie jonizujące była wyższa niż ta obserwowana po napromieniowywaniu komórek jedynie protonami (4,9 MeV) i cząsteczkami α (23 meV). Analiza zależności między dawką a efektem wskazuje, że pole magnetyczne dla protonów istotnie wpływało na zależność dawka–efekt. Shaw i wsp. [67] badali wpływ ekspozycji na SPM o indukcji 70 mT na działanie różnych nanocząstek na jednojądrowe komórki krwi obwodowej (*peripheral blood mononuclear cell* – PBMC) i monocytową linię komórkową chłoniaka U937. Stwierdzili korzystny wpływ SPM np. na zwiększenie liczby uszkodzeń DNA jedynie w komórkach nowotworowych z nanocząstkami tlenku żelaza i złota ekspozowanych jednocześnie

na pole. Z kolei Okonogi i wsp. [68] stwierdzili znaczące zmniejszenie liczby indukowanych mitomycyną C mikrojąder w komórkach CHL/IU po 6-godzinnej ekspozycji na SPM o indukcji 4,7 T, natomiast Zmysłony i wsp. [69] zauważyli wpływ słabego SPM o indukcji 7 mT na liczbę uszkodzeń DNA w limfocytach krwi obwodowej szczura powodowanych przez dodane do próbki jony żelaza.

Szczególnie ważne dla analizy zagrożeń zdrowia pracowników przebywających przy MRI jest skojarzone działanie SPM i promieniowania X – bywają oni bardzo często narażeni na oba czynniki. W pracy Teodori i wsp. [70] stwierdzili, że narażenie komórek na promieniowanie X o dawce 5 Gy spowodowało uszkodzenia DNA, które następnie po 6 godz. lub 20 godz. ekspozycji na SPM o indukcji 80 mT znacznie się zmniejszyły. Z kolei Sarvestani i wsp. [71] wskazali w swojej pracy, że SPM o indukcji 15 mT (ekspozycja przez 5 godz.) intensyfikuje działanie genotoksyczne wcześniej zastosowanego promieniowania X (promieniowanie X 140 kVp i 40 mA z filtrem 2,5 mm aluminium, dawka zaabsorbowana 0,5 Gy w czasie 1 s) w komórkach macierzystych szpiku kostnego szczurów. Kubiny i wsp. [72] zaobserwowali, że działające przez 4 godz. i 18 godz. SPM o indukcji $159,2 \pm 13,4$ mT, następujące po narażeniu na dawkę pochłoniętą 4 Gy promieniowania gamma kobaltu-60, istotnie zmienia statystycznie liczbę uszkodzeń DNA w stosunku do grupy ekspozowanej jedynie na promieniowanie jonizujące. Istnieją jednak badania, które nie potwierdzają tych obserwacji, np. Rockwell [73] nie stwierdził zwiększenia liczby uszkodzeń DNA i zaburzeń procesu ich naprawy w komórkach nowotworowych myszy EMT6 napromieniowywanych promieniowaniem X 120 kV o dawce pochłoniętej 5 Gy przed albo podczas ekspozycji na SPM o indukcji 0,14 T.

Procesy oksydacyjne

Od wielu lat wśród badaczy genotoksyczności dużym zainteresowaniem cieszy się hipoteza o jej oksydacyjnym charakterze. Dotyczy to również genotoksyczności PEM, a zwłaszcza SPM, co jest związane z hipotezą ich wpływu na pary rodników. W wielu procesach biochemicznych, zarówno endo- jak i egzogennych, na skutek rozerwania wiązań łączących atomy w cząsteczki powstają pary cząstek mających po jednym niesparowanym elektronie na powłokach walencyjnych – tworzy się w ten sposób para rodników. Jej historia może biec kilkoma torami [74]. W pierwszym, bardzo krótkim okresie rodniki znajdują się w bardzo niewielkiej

odległości, w której ma znaczenie reakcja wymiany elektronu ($J(r) > 0$). Obszar ten nazywany jest obszarem bliźniaczym lub klatkowym, a para rodników – parą bliźniaczą. W obszarze tym może dojść do rekombinacji pary rodników (czas potrzebny do rekombinacji dla cząsteczek o wielkości 100 Da, poruszających się przez ośrodek o lepkości wody, wynosi ok. 0,2 ns, dla cząsteczki bardzo dużej (65 000 Da) wzrasta do 3 ns [75]). Jeżeli z jakiegoś powodu rekombinacja nie nastąpi, rodniki wychodzą z obszaru klatkowego, stając się wolnymi rodnikami oddziałującymi z cząsteczkami ośrodka, w którym się poruszają. Aby mogło dojść do rekombinacji rodników, konieczna jest nie tylko odpowiednia odległość, ale potrzebny jest też odpowiedni stosunek spinów rodników (musi być on singletowy, czyli spiny pary rodników muszą być do siebie antyrównoległe). Korzystając z teorii zjawiska Zeemana, wykazuje się, że zewnętrzne SPM (w skojarzonym działaniu z polem magnetycznym jąder atomowych) może zmieniać wzajemną orientację spinów i w ten sposób wpływać na kinetykę rekombinacji par rodników.

Jak wspomniano, w układach biologicznych niektóre reakcje biochemiczne przechodzą przez etapy, w których tworzone są pary rodników. Ze względu na występowanie opisanych wyżej mechanizmów wpływu pól magnetycznych na tempo rekombinacji par rodników (a tym samym na wielkość stresu oksydacyjnego) obecność pola może zaburzać przebieg tych reakcji. Mechanizm oddziaływania SPM na pary rodników został odkryty i opisany dla procesów fotosyntezy [76,77], a następnie rozwinięty dla reakcji enzymatycznych w procesach antyoksydacyjnych i dla uszkodzeń powodowanych w komórkach przez proces peroksydacji lipidów. Harkins i Grissom [78,79] potwierdzili tę hipotezę, analizując działanie zależnej od koenzymu B_{12} liazy etanolaminy amonowej. Stwierdzili m.in., że w polu 100 mT kinetyka reakcji zmniejsza się o 25%. Z kolei Eichwald i Walleczek [80] wykazali wpływ SPM również na dynamikę reakcji oscylacyjnej peroksydazy–oksydazy. Na podstawie tych badań Eichwald i Walleczek [81] opracowali model wpływu pola magnetycznego na tempo reakcji enzymatycznych bazujący na mechanizmie par rodników, którego przewidywania zgadzają się z wynikami eksperymentów. Analiza tego modelu pozwoliła m.in. wywnioskować, że nawet bardzo małe zmiany ilości rekombinujących par rodników (rzędu 0,5–2%) mogą nawet stokrotnie zwiększyć tempo reakcji enzymatycznych [81].

Procesy oksydacyjne prowadzące do uszkodzeń komórki stanowią przedmiot dużego zainteresowania bio-

elektromagnetyków. Większość ich prac dotyczy wpływu SPM na procesy oksydacyjne powodowane przez różne czynniki egzogenne – wynikające z nich obserwacje nie są jednak spójne. Wiele badań potwierdza taki wpływ, np. Jajte i wsp. [82] wykazali, że SPM o indukcji 7 mT w obecności jonów Fe^{2+} może zwiększyć stężenie wolnych rodników tlenowych w komórkach limfocytów, a zatem prowadzić do śmierci komórki. Tenuzzo i wsp. [83] opisali wpływ ekspozycji na SPM o indukcji 6 mT na indukowane przez cykloheksymid apoptozę, wpływ jonów wapnia oraz ekspresję niektórych genów (*bcl-2*, *bax*, *p53* i *hsp70*) w świeżo wyizolowanych i w hodowli ludzkich limfocytów. Synowiec-Wojtarowicz i wsp. [84] pokazali, że narażenie na SPM (0,7 T) z dihydrochalkonami powoduje stres oksydacyjny w fibroblastach, Fanelli i wsp. [85] wykazali, że SPM o indukcjach powyżej 0,6 mT zmniejsza wywoływaną przez różne czynniki apoptozę w różnych układach komórkowych. Podobne obserwacje można znaleźć w innych pracach, np. Flipo i wsp. [86] oraz Tendori i wsp. [87]. Przeprowadzono jednak badania, w których autorzy nie obserwowali takiego efektu. Romeo i wsp. [50] raportowali brak wpływu na żywotność komórek, poziom reaktywnych form tlenu i integralność DNA w ludzkich płodowych fibroblastach MRC-5 narażonych na indukcję magnetyczną o poziomie 370 mT. Z kolei Pawłowska-Góral i wsp. [88] stwierdzili, że SPM o indukcjach 0,4 T, 0,55 T i 0,7 T nie wywierają negatywnego wpływu na stan utleniania fibroblastów skóry człowieka.

Według niektórych specjalistów ewentualne działanie oksydacyjne SPM może być wykorzystywane do celów terapeutycznych. Öztürk i wsp. [89] stwierdzili, że wpływa ono inaczej na parametry oksydacyjne w tkankach nowotworowych i nienowotworowych (powoduje wzrost aktywności SOD i spadek poziomu MDA w tkance nienowotworowej, natomiast zmniejsza aktywność SOD i peroksydazy glutationowej, a zwiększa aktywność MDA i katalazy w tkance rakowej).

Z punktu widzenia efektów biologicznych występujących u pracowników zatrudnionych przy MRI warte szczególnej uwagi są prace: Sarvestani i wsp. [71], w której autorzy również zaobserwowali wpływ SPM m.in. na liczbę wolnych rodników (i nie tylko) w komórkach macierzystych szpiku kostnego napromieniowanych wcześniej przez promieniowanie X, oraz Politańskiego i wsp. [90], w której autorzy wykazali istotny wpływ ekspozycji na SPM o indukcji 50 μ T i 5 mT na pulę wewnątrzkomórkowych reaktywnych form tlenu w limfocytach krwi obwodowej szczurów uprzednio

poddanych działaniu promieniowania X o dawce pochłoniętej 3 Gy (moc dawki 560 mGy/min).

Układ krążenia

Jak wspomniano, układ krążenia jest uważany za szczególnie wrażliwy na działanie PEM. Najlepiej udokumentowanym efektem wpływu pola magnetycznego na układ krążenia jest generowanie tzw. potencjałów przepływowych w tętnicach na skutek przepływu krwi. Wykazano, że w aorcie o średnicy 0,025 m i prędkości przepływu krwi 0,63 m/s w polu magnetycznym powstaje potencjał równy 16 mV/1 T. Potencjał taki, aż do poziomu kilku T, nie ma negatywnego wpływu nawet na tak wrażliwy organ, jakim jest serce [91]. Dokładną analizę tego zjawiska można znaleźć w pracy Tenforda [92]. Pozostałe efekty działania SPM na układ krążenia zostały opisane w następnym rozdziale.

Układ nerwowy

Ze względu na swoją budowę i sposób działania (wytwarzanie i propagacja impulsów elektrycznych) układ nerwowy wydaje się najbardziej wrażliwy na działanie PEM. W klasycznym ujęciu w ciele pracowników zatrudnionych w warunkach narażenia na SPM występują 2 zjawiska: powstawanie siły działającej na poruszające się naładowane cząsteczki (taki mechanizm prowadzi również do powstania potencjałów przepływowych) i indukcja pola elektrycznego / prądu elektrycznego w poruszających się przewodnikach (w przypadku pracowników zatrudnionych przy MRI występuje to przy ich przemieszczaniu się wokół skanera). Wartości indukowanego pola elektrycznego/gęstości prądu indukowanego w ciele pacjentów bądź personelu MRI można znaleźć np. w pracy Crozier i Liu [93]. Pojawia się tu pytanie, czy prądy te mogą powodować zauważalne i uciążliwe efekty sensoryczne u personelu obsługującego MRI. Autorzy zajmujący się tym zagadnieniem stwierdzają, że u osób przebywających w pobliżu skanerów wytwarzających SPM powyżej 1,5 T mogą wystąpić magnetofosfory, zawroty i bóle głowy, metaliczny posmak w ustach, brak koncentracji, zmęczenie i stymulacja mięśni [94–97]. Bardzo dokładną analizę wpływu indukowanych pod wpływem ruchu w SPM pól elektrycznych / prądu elektrycznego oraz przegląd literatury na ten temat przeprowadzono w wytycznych Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP) [98]. Jednym z najważniejszych wniosków z prowadzonych badań jest stwierdzenie, że obserwowane objawy są

ostre i przejściowe. Również nowsze analizy potwierdzają ten wniosek [99–101].

Ponadto część badaczy wskazuje na możliwość pojawienia się u pracowników narażonych na stosunkowo silne SPM, jakie mogą występować np. wokół niektórych skanerów MRI, oprócz wspomnianych wyżej objawów także efektów neurobehawioralnych. Badań na ten temat jest jednak stosunkowo niewiele i trudno wyciągnąć z nich spójne wnioski. Metaanaliza wykonana przez Heinrich i wsp. [102] objęła 5 prac. Wykazała, że we wszystkich badaniach jedynie wpływ na spostrzeżenie był podobny – pogorszony [103–105]. Badania koordynacji oko–ręka dały wyniki rozbieżne: w 2 wykazano lekkie ich polepszenie [103,104], a w 2 – pogorszenie [97,105]. Niespójne wyniki uzyskano też w analizach wpływu SPM na pamięć roboczą – w 1 badaniu stwierdzono, że jest on zdecydowanie negatywny [106], w innym, że jest zdecydowanie dodatni [97], w 3 badaniach efekty pozostały niezmienione [103,105,107]. Podkreślić należy, że niezależnie od różnic w uzyskanych wynikach autorzy stwierdzają, że efekty neurobehawioralne mają charakter przejściowy.

WNIOSKI

Jak wynika z niniejszego przeglądu literatury dotyczącej badań stanu zdrowia osób zawodowo narażonych na SPM (w tym szczególnie pracowników zatrudnionych przy MRI), obecnie nie ma podstaw do przyczynowo-skutkowego powiązania narażenia na SPM z jego negatywnymi skutkami dla zdrowia. Ze względu na niewielką liczbę opisywanych badań, które w dodatku zostały przeprowadzone stosunkowo dawno, niesłuszne wydaje się jednak formowanie jednoznacznych płynących z nich wniosków. Konieczne jest zatem jak najszybsze ponowne podjęcie badań, zwłaszcza wśród pracowników zatrudnionych przy MRI – zwiększyła się przecież ich liczebność, wielkość ekspozycji oraz czas narażenia na pole magnetyczne. Badania tej grupy zawodowej potrzebne są także ze względu na jednoczesną ekspozycję zarówno na SPM przy urządzeniach MRI, jak i na promieniowanie jonizujące podczas pracy przy aparatach rentgenowskich, co może mieć duże znaczenie zdrowotne (w świetle satysfakcjonująco udokumentowanej hipotezy o synergistycznym działaniu SPM z promieniowaniem X).

Ponieważ dotychczasowe badania nie są rozstrzygające, konieczne wydaje się także zintensyfikowanie analiz wpływu SPM na procesy biologiczne, np. genotoksyczności czy procesów oksydacyjnych, mogące leżeć u podstaw rozwoju wielu chorób.

PIŚMIENNICTWO

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE. DzU UE z 2013 r. L 179/1-21
2. Stuchly M.A.: Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Phys.* 1986;51:215–225, <https://doi.org/10.1097/00004032-198608000-00006>
3. Moss C.E., Salisbury S.A., Burr G.A.: Health hazard evaluation report: HETA-90-0244-2414, Alumax of South Carolina, Inc., Goose Creek, South Carolina. Cincinnati: Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, kwiecień 1994 (doniesienie nr 90–224)
4. Marsh J.L., Armstrong T.J., Jacobson A.P., Smith R.G.: Health effect of occupational exposure to steady magnetic fields. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1982;43:387–394, <https://doi.org/10.1080/15298668291409910>
5. Barregard L., Jarvholm B., Ungethum E.: Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *Lancet* 1985;2(8460):892, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(85\)90157-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(85)90157-6)
6. Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P.: Ocena zagrożeń związanych z polami elektromagnetycznymi przy obsłudze diagnostycznych i terapeutycznych urządzeń medycznych (takich jak: rezonans magnetyczny, diatermie fizykoterapeutyczne i elektrochirurgiczne). Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2008
7. Milham S.: Mortality in aluminium reduction plant workers. *J. Occup. Med.* 1979;21:475–480
8. Rockette H.E., Arena V.C.: Mortality studies of aluminium reduction plant workers: Potroom and carbon department. *J. Occup. Med.* 1983;25:549–557
9. Ronneberg A., Andersen A.: Mortality and cancer morbidity in workers from an aluminium smelter with prebaked carbon anodes – Part II: Cancer morbidity. *Occup. Environ. Med.* 1995;52:250–254, <https://doi.org/10.1136/oem.52.4.250>
10. Spinelli J., Band P.R., Svirchev L.M., Gallagher R.P.: Mortality and cancer incidence in aluminum reduction plant workers. *J. Occup. Med.* 1991;33:1150–1155
11. Mur J.M., Moulin J.J., Meyer-Bisch C., Massin N., Coulon J.P., Loulergue J.: Mortality of aluminium reduction plant workers in France. *Int. J. Epidemiol.* 1987;16:257–264, <https://doi.org/10.1093/ije/16.2.257>
12. Savitz D.A., Calle E.E.: Leukemia and occupational exposure to electromagnetic fields: Review of epidemiological surveys. *J. Occup. Med.* 1987;29:47–51
13. Bellosi A.: The effect of a static uniform magnetic field on mice a study of methylcholanthren carcinogenesis. *Radiat. Environ. Biophys.* 1984;23:107–109, <https://doi.org/10.1007/BF01213734>
14. Mevissen M., Stamm A., Buntenkötter S., Zwingleberg R., Wahnschaffe U., Löscher W.: Effects of magnetic fields on mammary tumour development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 1993; 14:131–143, <https://doi.org/10.1002/bem.2250140206>
15. Strelczyk D., Eichhorn M.E., Luedemann S., Brix G., Delian M., Berghaus A. i wsp.: Static magnetic fields impair angiogenesis and growth of solid tumors *in vivo*. *Cancer Biol. Ther.* 2009;8(18):1756–1762, <https://doi.org/10.4161/cbt.8.18.9294>
16. Gray J.R., Frith C.H., Parker J.D.: *In vivo* enhancement of chemotherapy with static electric or magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2000;21(8):575–583, [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200012\)21:8<575::AID-BEM3>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1521-186X(200012)21:8<575::AID-BEM3>3.0.CO;2-F)
17. Tofani S., Barone D., Berardelli M., Berno E., Cintorino M., Foglia L. i wsp.: Static and ELF magnetic fields enhance the *in vivo* anti-tumor efficacy of cis-platin against lewis lung carcinoma, but not of cyclophosphamide against B16 melanotic melanoma. *Pharm. Res.* 2003;48(1):83–90, [https://doi.org/10.1016/S1043-6618\(03\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S1043-6618(03)00062-8)
18. Sun R.G., Chen W.F., Qi H., Zhang K., Bu T., Liu Y. i wsp.: Biologic effects of SMF and paclitaxel on K562 human leukemia cells. *Gen. Physiol. Biophys.* 2012;31(1):1–10, https://doi.org/10.4149/gpb_2012_002
19. Chen W.F., Qi H., Sun R.G., Liu Y., Zhang K., Liu J.Q.: Static magnetic fields enhanced the potency of cisplatin on K562 cells. *Cancer Biother. Radiopharm.* 2010;25(4):401–408, <https://doi.org/10.1089/cbr.2009.0743>
20. Hao Q., Wenfang C., Xia A., Qiang W., Ying L., Zhang K. i wsp.: Effects of a moderate-intensity static magnetic field and adriamycin on K562 cells. *Bioelectromagnetics* 2011;32(3):191–199, <https://doi.org/10.1002/bem.20625>
21. Chionna A., Tenuzzo B., Panzarini E., Dwikat M.B., Abbro L., Dini L.: Time dependent modifications of Hep G2 cells during exposure to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2005;26(4):275–286, <https://doi.org/10.1002/bem.20081>
22. Kanal E., Gillen J., Evans J.A., Savitz D.A., Shellock F.D.: Survey of reproductive health among female MR workers.

- Radiology 1993;187(2):395–399, <https://doi.org/10.1148/radiology.187.2.8475280>
23. Myers C., Duncan K.R., Gowland P.A., Johnson I.R., Baker P.N.: Failure to detect intrauterine growth restriction following in utero exposure to MRI. *Br. J. Radiol.* 1998;71:549–551, <https://doi.org/10.1259/bjr.71.845.9691901>
24. Mur J.M., Wild P., Rapp R., Vautrin J.P., Colon J.P.: Demographic evaluation of the fertility of aluminium industry workers: Influence of exposure to heat and static magnetic fields. *Hum. Reprod.* 1998;13:2016–2019, <https://doi.org/10.1093/humrep/13.7.2016>
25. Tablado L., Soler C., Nunez M., Nunez J., Perez-Sanchez F.: Development of mouse testis and epididymis following intrauterine exposure to a static magnetic field. *Bioelectromagnetics* 2000;21(1):19–24, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(200001\)21:1%3C19::AID-BEM4%3E3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(200001)21:1%3C19::AID-BEM4%3E3.0.CO;2-1)
26. Narra V.R., Howell R.W., Goddu S.M., Rao D.V.: Effects of a 1.5-Tesla static magnetic field on spermatogenesis and embryogenesis in mice. *Invest. Radiol.* 1996;31(9):586–590, <https://doi.org/10.1097/00004424-199609000-00007>
27. Monfared A.S., Jorsaraei S.G., Abdi R.: Protective effects of vitamins C and E on spermatogenesis of 1.5 Tesla magnetic field exposed rats. *J. Magn. Reson. Imaging* 2009;30(5):1047–1051, <https://doi.org/10.1002/jmri.21853>
28. Bekhite M.M., Finkensieper A., Abou-Zaid F.A., El-Shourbagy I.K., El-Fiky N.K., Omar K.M. i wsp.: Differential effects of high and low strength magnetic fields on mouse embryonic development and vasculogenesis of embryonic stem cells. *Reprod. Toxicol.* 2016;65:46–58, <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2016.06.016>
29. Espinar A., Piera V., Carmona A., Guerrero J.M.: Histological changes during development of the cerebellum in the chick embryo exposed to a static magnetic field. *Bioelectromagnetics* 1997;18(1):36–46, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:1%3C36::AID-BEM7%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:1%3C36::AID-BEM7%3E3.0.CO;2-6)
30. Levin M., Ernst S.G.: Applied DC magnetic fields cause alterations in the time of cell division and developmental abnormalities in early sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics* 1997;18(3):255–263
31. Ueno S., Iswasaka M., Shiokawa K.: Early embryonic-development of frogs under intense magnetic fields up to 8 T. *J. Appl. Phys.* 1994;75(10):7165–7167, <https://doi.org/10.1063/1.356716>
32. Zahedi Y., Zaun G., Maderwald S., Orzada S., Pütter C., Scherag A. i wsp.: Impact of repetitive exposure to strong static magnetic fields on pregnancy and embryonic development of mice. *J. Magn. Reson. Imaging* 2014;39(3):691–699, <https://doi.org/10.1002/jmri.24209>
33. Ghotbi M.R., Mardi H., Khanjani N., Parvaresh N.: Occupational exposure to steady magnetic fields and mental health of workers at the copper electrolysis unit. *J. Saf. Stud.* 2015;1(2):1–10, <https://doi.org/10.5296/jss.v1i2.8485>
34. Levine R.L., Dooley J.K., Bluni T.D.: Magnetic field effects on spatial discrimination and melatonin levels in mice. *Physiol. Behav.* 1995;58(3):535–537, [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(95\)00094-Y](https://doi.org/10.1016/0031-9384(95)00094-Y)
35. Trzeciak H.I., Grzesik J., Bortel M., Kuśka R., Duda D., Michnik J. i wsp.: Behavioral effects of long-term exposure to magnetic fields in rats. *Bioelectromagnetics* 1993;14:287–297, <https://doi.org/10.1002/bem.2250140402>
36. Nakagawa M., Matsuda Y.: A strong static-magnetic field alters operant responding by rats. *Bioelectromagnetics* 1988;9:25–37, <https://doi.org/10.1002/bem.2250090103>
37. Hong C.Z., Huestis P., Thompson R., Yu J.: Learning ability of young rats is unaffected by repeated exposure to a static electromagnetic field in early life. *Bioelectromagnetics* 1988;9:269–273, <https://doi.org/10.1002/bem.2250090308>
38. Tenforde T.S., Gaffey C.T., Moyer B.R., Budinger T.F.: Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: Experimental observation and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics* 1983;4:1–9, <https://doi.org/10.1002/bem.2250040102>
39. Kangarlu A., Burgess R.E., Zhu H., Nakayama T., Hamlin R.L., Abduljalil A.M. i wsp.: Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Magn. Reson. Imaging* 1999;17:1407–1416, [https://doi.org/10.1016/S0730-725X\(99\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0730-725X(99)00086-7)
40. Chakeres D.W., Kangarlu A., Boudoulas H., Young D.C.: Effect of static magnetic field exposure of up to 8 T on sequential human vital sign measurements. *J. Magn. Reson. Imaging* 2003;18:346–352, <https://doi.org/10.1002/jmri.10367>
41. Tasić T., Djordjević D.M., De Luka S.R., Trbovich A.M., Japundžić-Žigon N.: Static magnetic field reduces blood pressure short-term variability and enhances baro-receptor reflex sensitivity in spontaneously hypertensive rats. *Int. J. Radiat. Biol.* 2017;93(5):527–534, <https://doi.org/10.1080/09553002.2017.1276307>
42. Gmitrov J.: Static magnetic field effect on microcirculation, direct versus baroreflex-mediated approach. *Electromagn. Biol. Med.* 2013;32(4):448–462, <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.743905>
43. Gungor H.R., Akkaya S., Ok N., Yorukoglu A., Yorukoglu C., Kiter E. i wsp.: Chronic exposure to static magnetic fields from magnetic resonance imaging devices deserves screening for osteoporosis and vitamin D levels:

- A rat model. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2015;12(8):8919–8932, <https://doi.org/10.3390/ijerph120808919>
44. Zhang J., Meng X., Ding C., Xie L., Yang P., Shang P.: Regulation of osteoclast differentiation by static magnetic fields. *Electromagn. Biol. Med.* 2017;36(1):8–19, <https://doi.org/10.3109/15368378.2016.1141362>
45. Elferchichi M., Mercier J., Coisy-Quivy M., Metz L., Lajoix A.D., Gross R. i wsp.: Effects of exposure to a 128-mT static magnetic field on glucose and lipid metabolism in serum and skeletal muscle of rats. *Arch. Med. Res.* 2010;41(5):309–314, <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2010.07.008>
46. Lahbib A., Ghodbane S., Sakly M., Abdelmelek H.: Vitamins and glucose metabolism: The role of static magnetic fields. *Int. J. Radiat. Biol.* 2014;90(12):1240–1245, <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.930537>
47. László J.F., Szilvási J., Fényi A., Szalai A., Gyires K., Pórszász R.: Daily exposure to inhomogeneous static magnetic field significantly reduces blood glucose level in diabetic mice. *Int. J. Radiat. Biol.* 2011;87(1):36–45, <https://doi.org/10.3109/09553002.2010.518200>
48. Vijayalaxmi, Fatahi M., Speck O.: Magnetic resonance imaging (MRI): A review of genetic damage investigations. *Mut. Res. Rev. Mutat. Res.* 2015;764:51–63, <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2015.02.002>
49. Raylman R.R., Clavo A.C., Wahl R.L.: Exposure to strong magnetic field slows the growth of human cancer cells *in vitro*. *Bioelectromagnetics* 1996;17:358–363, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1996\)17:5%3C358::AID-BEM2%3E3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:5%3C358::AID-BEM2%3E3.0.CO;2-2)
50. Romeo S., Sannino A., Scarfi M.R., Massa R., d'Angelo R., Zeni O.: Lack of effects on key cellular parameters of MRC-5 human lung fibroblasts exposed to 370 mT static magnetic field. *Sci. Rep.* 2016;6:19398, <https://doi.org/10.1038/srep19398>
51. Amara S., Douki T., Ravanat J.L., Garrel C., Guiraud P., Favier A. i wsp.: Influence of a static magnetic field (250 mT) on the antioxidant response and DNA integrity in THP1 cells. *Phys. Med. Biol.* 2007;52(4):889–898, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/52/4/002>
52. Szerencsi Á., Kubinyi G., Váliczkó É., Juhász P., Rudas G., Mester Á. i wsp.: DNA integrity of human leukocytes after magnetic resonance imaging. *Int. J. Radiat. Biol.* 2013; 89(10):870–876, <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.804962>
53. Reddig A., Fatahi M., Friebe B., Guttek K., Hartig R., Godeschweger F. i wsp.: Analysis of DNA double-strand breaks and cytotoxicity after 7 tesla magnetic resonance imaging of isolated human lymphocytes. *PLoS One* 2015;10(7):e0132702, <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0132702>
54. Schreiber W.G., Teichmann E.M., Schiffer I., Hast J., Akbari W., Georgi H. i wsp.: Lack of mutagenic and co-mutagenic effects of magnetic fields during magnetic resonance imaging. *J. Magn. Reson. Imaging* 2001;14(6):779–788, <https://doi.org/10.1002/jmri.10010>
55. Cooke P., Morris P.G.: The effects of NMR exposure on living organisms. II. A genetic study of human lymphocytes. *Br. J. Radiol.* 1981;54:622–625, <https://doi.org/10.1259/0007-1285-54-643-622>
56. Peteiro-Cartelle F.J., Cabezas-Cerrato J.: Absence of kinetic and cytogenetic effects on human lymphocytes exposed to static magnetic fields. *J. Bioelectr.* 1989;8:11–19, <https://doi.org/10.3109/15368378909020940>
57. Geard C.R., Osmak R.S., Hall E.J., Simon H.E., Maudsley A.A., Hilal S.K.: Magnetic resonance and ionizing radiation: A comparative evaluation *in vitro* of oncogenic and genotoxic potential. *Radiology* 1984;152:199–202, <https://doi.org/10.1148/radiology.152.1.6729111>
58. Ruiz-Gómez M.J., Ristori-Bogajo E., Prieto-Barcia M.I., Martínez-Morillo M.: No evidence of cellular alterations by MilliTesla-level static and 50 Hz magnetic fields on *S. cerevisiae*. *Electromagn. Biol. Med.* 2010;29(4):154–164, <https://doi.org/10.3109/07435800.2010.505158>
59. 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(1):55–60, [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(96\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(96)00188-1)
60. Suzuki Y., Ikehata M., Nakamura K., Nishioka M., Asanuma K., Koana T. i wsp.: Induction of micronuclei in mice exposed to static magnetic fields. *Mutagenesis* 2001;16(6): 499–501, <https://doi.org/10.1093/mutage/16.6.499>
61. 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* 2011; 32(7):535–542, <https://doi.org/10.1002/bem.20664>
62. Potenza L., Martinelli C., Polidori E., Zeppa S., Calcabrin C., Stocchi L. i wsp.: Effects of a 300 mT static magnetic field on human umbilical vein endothelial cells. *Bioelectromagnetics* 2010;31(8):630–639, <https://doi.org/10.1002/bem.20591>
63. Zhang Q.M., Tokiwa M., Doi T., Nakahara T., Chang P.W., Nakamura N. i wsp.: Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in *Escherichia coli* soxR. *Int. J. Radiat. Biol.* 2003;79(4):281–286, <https://doi.org/10.1080/0955300031000096289>

64. Kale P.G., Baum J.W.: Genetic effects of strong magnetic fields in *Drosophila melanogaster*, II. Lack of interaction between homogeneous fields and fission neutron-plus-gamma radiation. *Environ. Mutagen.* 1980;2:179–186, <https://doi.org/10.1002/em.2860020210>
65. Kimura T., Takahashi K., Suzuki Y., Konishi Y., Ota Y., Mori C. i wsp.: The effect of high strength static magnetic fields and ionizing radiation on gene expression and DNA damage in *Caenorhabditis elegans*. *Bioelectromagnetics* 2008;29(8):605614, <https://doi.org/10.1002/bem.20425>
66. Takatsuji T., Sasaki M.S., Takekoshi H.: Effect of static magnetic fields on the induction of chromosome aberrations by 4.9 MeV protons and 23 MeV alpha particles. *J. Radiat. Res.* 1989;30:238–246, <https://doi.org/10.1269/jrr.30.238>
67. Shaw J., Raja S.O., Dasgupta A.K.: Modulation of cytotoxic and genotoxic effects of nanoparticles in cancer cells by external magnetic field. *Cancer Nanotechnol.* 2014;5(1):2, <https://doi.org/10.1186/s12645-014-0002-x>
68. 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;80(3):209–215, <https://doi.org/10.1620/tjem.180.209>
69. Zmysłony M., Palus J., Jajte J., Dziubaltowska 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(1):89–96, [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00094-4)
70. Teodori L., Giovanetti A., Albertini M.C., Rocchi M., Perniconi B., Valente M.G. i wsp.: Static magnetic fields modulate X-ray-induced DNA damage in human glioblastoma primary cells. *J. Radiat. Res.* 2014;55(2):218–227, <https://doi.org/10.1093%2Fjrr%2Frrt107>
71. Sarvestani A.S., Abdolmaleki P., Mowla S.J., Ghanati F., Heshmati E., Tavasoli Z. i wsp.: Static magnetic fields aggravate the effects of ionizing radiation on cell cycle progression in bone marrow stem cells. *Micron* 2010;41(2):101–114, <https://doi.org/10.1016/j.micron.2009.10.007>
72. Kubinyi G., Zeitler Z., Thuróczy G., Juhász P., Bakos J., Sinay H. i wsp.: Effects of homogeneous and inhomogeneous static magnetic fields combined with gamma radiation on DNA and DNA repair. *Bioelectromagnetics* 2010;31(6):488–494, <https://doi.org/10.1002/bem.20577>
73. Rockwell S.: Influence of a 1400-gauss magnetic fields on the radiosensitivity and recovery of EMT6 cells *in vitro*. *Int. J. Rad. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 1977;31:153–160, <https://doi.org/10.1080/09553007714550171>
74. McLauchlan K.A., Steiner U.E.: The spin correlated radical pair as a reaction intermediate. *Mol. Phys.* 1991;73(2):241–263, <https://doi.org/10.1080/00268979100101181>
75. Adair R.K.: Effects of very weak magnetic fields on radical pair reformation. *Bioelectromagnetics* 1999;20:255–263, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1999\)20:4%3C255::AID-BEM6%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1999)20:4%3C255::AID-BEM6%3E3.0.CO;2-W)
76. Blankenship R.E., Schaafsma T.J., Parson W.W.: Magnetic field effects on radical pair intermediates in bacterial photosynthesis. *Biochim. Biophys. Acta* 1977;461:297–305, [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(77\)90179-7](https://doi.org/10.1016/0005-2728(77)90179-7)
77. Michel-Beyerle M.E., Scheer H., Seidlitz H., Tempus D., Haberkorn R.: Time-resolved magnetic field effect on triplet formation in photosynthetic reaction center of *Rhodospseudomonas sphaeroides* R-26. *FEBS Lett.* 1979;100:9–12, [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(79\)81120-5](https://doi.org/10.1016/0014-5793(79)81120-5)
78. Harkins T.T., Grissom Ch.B.: Magnetic field effect on B12 ethanolamine ammonia lyase: evidence for a radical mechanism. *Science* 1994;263:958–960, <https://doi.org/10.1126/science.8310292>
79. Harkins T.T., Grissom C.B.: The magnetic field dependent step in B12 ethanolamine ammonia lyase is radical-pair recombination. *J. Am. Chem. Soc.* 1995;117:566–567, <https://doi.org/10.1021/ja00106a079>
80. Eichwald C., Walleczek J.: Magnetic field perturbations as a tool for controlling enzyme-regulated and oscillatory biochemical reactions. *Bioph. Chem.* 1998;74(3):209–224, [https://doi.org/10.1016/S0301-4622\(98\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4622(98)00180-X)
81. Eichwald C., Walleczek J.: Model for magnetic field effects on radical pair recombination in enzyme kinetics. *Biophys. J.* 1996;71:623–631, [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(96\)79263-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(96)79263-9)
82. Jajte J., Grzegorzczak J., Zmysłony M., Rajkowska E.: Effect of 7 mT static magnetic field and iron ions on rat lymphocytes: Apoptosis, necrosis and free radical processes. *Bioelectrochemistry* 2002;57(2):107–111, [https://doi.org/10.1016/S1567-5394\(02\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S1567-5394(02)00059-2)
83. Tenuzzo B., Vergallo C., Dini L.: Effect of 6mT static magnetic field on the bcl-2, bax, p53 and hsp70 expression in freshly isolated and *in vitro* aged human lymphocytes. *Tissue Cell* 2009;41(3):169–179, <https://doi.org/10.1016/j.tice.2008.09.004>
84. Synowiec-Wojtarowicz A., Kimsa-Dudek M., Pawłowska-Góral K., Kurzeja E., Glinka M., Gawron S.: Influence of static magnetic fields up to 700 mT and dihydrochalcones on the antioxidant response in fibroblasts. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 2017;52(4):385–390, <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1262604>
85. Fanelli C., Coppola S., Barone R., Colussi C., Gualandi G., Volpe P. i wsp.: Magnetic fields increase cell survival by inhibiting apoptosis via modulation of Ca²⁺ influx. *FASEB J.* 1999;13(1):95–102, <https://doi.org/10.1096/fasebj.13.1.95>

86. Flipo D., Fournier M., Benquet C., Roux P., Le Boulaire C., Pinsky C. i wsp.: Increased apoptosis, changes in intracellular Ca²⁺, and functional alterations in lymphocytes and macrophages after *in vitro* exposure to static magnetic field. *J. Toxicol. Environ. Health A.* 1998;54(1):63–76, <https://doi.org/10.1080/009841098159033>
87. Teodori L., Göhde W., Valente M.G., Tagliaferri F., Coletti D., Perniconi B. i wsp.: Static magnetic fields affect calcium fluxes and inhibit stress-induced apoptosis in human glioblastoma cells. *Cytometry* 2002;49(4):143–149, <https://doi.org/10.1002/cyto.10172>
88. Pawłowska-Góral K., Kimsa-Dudek M., Synowiec-Wojtawicz A., Orchel J., Glinka M., Gawron S.: Effect of static magnetic fields and phloretin on antioxidant defense system of human fibroblasts. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016;23(15):14989–14996
89. Öztürk B., Durak Z.E., Büber S., Kocaoğlu E.H.: Effect of static magnetic field on oxidant/antioxidant parameters in cancerous and noncancerous human gastric tissues. *Scientifica (Cairo)* 2016;2016:8608462, <https://doi.org/10.1155/2016/8608462>
90. Politański P., Rajkowska E., Brodecki M., Bednarek A., Zmysłony M.: Combined effect of X-ray radiation and static magnetic fields on reactive oxygen species in rat lymphocytes *in vitro*. *Bioelectromagnetics* 2013;34(4):333–336, <https://doi.org/10.1002/bem.21767>
91. World Health Organization: Environmental health criteria 69. Magnetic fields. Organization, Genewa 1987
92. Tenforde T.S.: Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2005;87(2–3):279–288, <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.003>
93. 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(2–3):267–278, <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.002>
94. Schenck J.F., Dumoulin C.L., Redington R.W., Kressel H.Y., Elliott R.T., McDougall I.L.: Human exposure to 4.0-Tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med. Phys.* 1992;19:1089–1098, <https://doi.org/10.1118/1.596827>
95. Shellock F.G.: Magnetic resonance procedures: Health effects and safety. CRC Press, Boca Raton 2000, <https://doi.org/10.1201/9781420041569>
96. Schenck J.F.: Safety of strong, static magnetic fields. *J. Magn. Reson. Imaging* 2000;12:2–19, [https://doi.org/10.1002/1522-2586\(200007\)12:1%3C2::AID-JMRI2%3E3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/1522-2586(200007)12:1%3C2::AID-JMRI2%3E3.0.CO;2-V)
97. De Vocht F., van Drooge H., Engels H., Kromhout H.: Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners. *J. Magn. Reson. Imaging* 2006;23:197–204, <https://doi.org/10.1002/jmri.20485>
98. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time varying magnetic fields below 1 Hz. *Health Phys.* 2014;106(3):418–425, <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31829e5580>
99. Schaap K., Christopher-de Vries Y., Mason C.K., de Vocht F., Portengen L., Kromhout H.: Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5–7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms. *Occup. Environ. Med.* 2014;71(6):423–429, <https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101890>
100. Schaap K., Portengen L., Kromhout H.: Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers. *Occup. Environ. Med.* 2016;73(3):161–166, <https://doi.org/10.1136/oemed-2015-103019>
101. De Vocht F., Batistatou E., Mölter A., Kromhout H., Schaap K., van Tongeren M. i wsp.: Transient health symptoms of MRI staff working with 1.5 and 3.0 Tesla scanners in the UK. *Eur. Radiol.* 2015;25(9):2718–2726, <https://doi.org/10.1007/s00330-015-3629-z>
102. Heinrich A., Szostek A., Nees F., Meyer P., Semmler W., Flor H.: Effects of static magnetic fields on cognition, vital signs, and sensory perception: A meta-analysis. *J. Magn. Reson. Imaging* 2011;34(4):758–763, <https://doi.org/10.1002/jmri.22720>
103. De Vocht F., van-Wendel-de-Joode B., Engels H., Kromhout H.: Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 Tesla magnetic resonance imaging system – A case-crossover pilot study. *Magn. Reson. Med.* 2003;50:670–674, <https://doi.org/10.1002/mrm.10604>
104. 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;23:291–297, <https://doi.org/10.1002/jmri.20510>
105. De Vocht F., Stevens T., Glover P., Gowland P., Kromhout H.: Cognitive effects of head-movements in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 2007;28:247–255, <https://doi.org/10.1002/bem.20311>
106. 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;23:291–297, <https://doi.org/10.1002/jmri.20510>
107. Chakeres D.W., Bornstein R., Kangarlu A.: Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 Tes-

la. J. Magn. Reson. Imaging 2003;1:342–345, <https://doi.org/10.1002/jmri.10366>

