

INSTYTUT MEDYCYNY PRACY
im. prof. dra med. Jerzego Nofera

STUDIA I MATERIAŁY MONOGRAFICZNE

Henryk Mikołajczyk, Maria Kameduła

**PORÓWNAWCZA OCENA
DZIAŁANIA BIOLOGICZNEGO
STAŁYCH, WOLNOZMIENNYCH
I SZYBKOSZMIENNYCH
PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH**

INSTYTUT MEDYCYNY PRACY IM. PROF. J. NOFERA



Zeszyt 32

ŁÓDŹ

1989

Redaguje zespół w składzie: dr hab. n. med. Henryk Mikołajczyk (red. nacz.), dr n. med. Zygmunt Starzyński (zca red. nacz.), dr med. Janusz Iżycki, prof. dr hab. n. fiz. Jerzy Jankowski, dr n. farm. Teresa Rogaczewska

Centralny Program Badawczo-Rozwojowy nr 11.11 "Medycyna Pracy"

Redaktor: prof. dr hab. Jerzy Jankowski



Redaktor wydawnictwa: mgr Zbigniew Nowacki

Wydawca:

Instytut Medycyny Pracy im. prof. dra med. Jerzego Nofera
Seksja Wydawnicza w Zakładzie Informacji Naukowej
90-950 Łódź, ul. Teresy 8
skr. poczt. 199
centrala 55-22-50, teleks nr 885360 imp pl



CONTENTS

1. Preface
2. Introductory notes
3. Physical characteristics of e-m fields
4. Induction heating
5. Dielectric heating
6. Jons (γ^+), atmospheric (E_{at}) and static (E_s) electricity, electric field of direct current
7. Measurements of physical parameters of electricity
8. Biological effects of static electricity
9. Permissible limits of static electricity
10. Static and time-varying magnetic field
11. Evaluation of exposure to e-m fields
12. Threshold of current perception
13. Mechanism of e-m fields activity
14. Biological membranes
15. Low-frequency e-m fields
16. High-frequency e-m fields
17. Biological effects of low-frequency e-m fields
18. Pathologic changes in workers occupationally exposed to e-m fields
19. E-m fields and the connective tissue
20. Other effects of e-m fields
21. Biological effects of human exposure to e-m fields of high intensity
22. General characteristics of our own studies
23. Exposure limits for e-m fields
 - 23.1. GOST standard, 12.1.006-08
 - 23.2. USA standard, ANSI C95.1-1982
 - 23.3. FRG standard, DIN/57848
 - 23.4. ACGIH guidelines
 - 23.5. CHEA standard, ST SEW 01.873.08-84
 - 23.6. IRPA/INIRC guidelines
 - 23.7. Polish standards and regulations
24. Guidelines for realistic assessment of exposure to e-m fields
 - 24.1. Historical outline
 - 24.2. Background for setting exposure limits for extremely low and medium frequency e-m fields
25. Comparison of theoretical calculations with the results of biological studies
 - 25.1. General conclusions
 - 25.2. Results for different frequency ranges of e-m fields
 - 25.3. Recommendations for verifying present and setting new exposure limits for e-m fields

References

Summary

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	7
2. Uwagi ogólne	11
3. Charakterystyka fizyczna pól e-m	16
4. Nagrzewanie indukcyjne	19
5. Nagrzewanie dielektryczne	20
6. Jony (j^{+-}), elektryczność atmosferyczna (E_{at}), statyczna (E_s), pole elektryczne prądu stałego (E_{d-c})	22
7. Metodyka pomiarów wielkości fizycznych elektryczności statycznej	30
8. Działanie biologiczne elektryczności statycznej	32
9. Dopuszczalne wielkości elektryczności statycznej	35
10. Pole magnetyczne stałe i wolnozmiennne	37
11. Ocena narażenia na pole magnetyczne	52
12. Ustalenia dotyczące odczuwania prądów	55
13. Problemy działania pól e-m	61
14. Błony biologiczne (komórkowe)	62
15. Pola e-m wolnozmiennne	64
16. Pola e-m szybkozmiennne	67
17. Podstawy działania biologicznego pól e-m małej częstotliwości	71
18. Zmiany patologiczne u pracowników narażonych na pola e-m w pracy zawodowej	72
19. Pola e-m a układ łącznotkankowy	90
20. Inne wpływy pól e-m	91
21. Efekty biologiczne u ludzi w wyniku narażenia na duże natężenia pola e-m	96
22. Charakterystyka ogólna badań własnych	99
23. Dopuszczalne natężenia pól e-m (NDN)	109
23.1. Standard GOST 12.1.006-08	110
23.2. Standard USA, ANSI C95.1-1982	113
23.3. Standard RFN, DIN/57 848	115
23.4. Wytyczne ACGIH	118
23.5. Standard RWPG, ST SEW 01.873.08-84	119
23.6. Wytyczne IRPA/INIRC	120
23.7. Charakterystyka istniejących przepisów i norm polskich	124
24. Wytyczne w sprawie realistycznej oceny narażenia na pola e-m	132
24.1. Rys historyczny	132
24.2. Podstawy ustalania NDN pól e-m bardzo małych i średnich częstotliwości	134
25. Znaczenie obliczeń teoretycznych i badań biologicznych w ustalaniu NDN pól e-m	135
25.1. Ustalenia ogólne	135
25.2. Ustalenia w odrębnych przedziałach częstotliwości pól e-m	136
25.3. Zalecenia zmian NDN i wytyczne do ustalania NDN pól e-m	136
Piśmiennictwo	137
Streszczenie (w jęz. ang. i ros.)	152

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	7
2. Общие замечания	11
3. Физическая характеристика электромагнитных полей	16
4. Индукционный нагрев	19
5. Диелектрический нагрев	20
6. Ионы $/j^{+-}/$, атмосферное электричество $/E_{at}/$, статическое электричество $/E_s/$, электрическое поле постоянного тока $/E_d-c/$	22
7. Методика измерений физических величин статического электричества	30
8. Биологическое действие статического электричества	32
9. Допустимые величины статического электричества	35
10. Магнитное постоянное и медленнопеременное поле	37
11. Оценка экспозиции к действию магнитного поля	52
12. Определения, относящиеся к восприятию токов	55
13. Проблемы действия электромагнитных полей	61
14. Биологические оболочки /клеточные/	62
15. Медленнопеременные электромагнитные поля	64
16. Быстропеременные электромагнитные поля	67
17. Основы биологического действия электромагнитных полей низких частот	71
18. Патологические изменения у лиц, подвергающихся воздействию электромагнитных полей на работе	72
19. Электромагнитные поля по отношению к соединительнотканной системе	90
20. Другое влияние электромагнитных полей	91
21. Биологические эффекты у людей в результате экспозиции к действию электромагнитных полей большой напряженности	96
22. Общая характеристика собственных исследований	99
23. Допустимые напряженности электромагнитных полей /ПДН/	109
23.1. Стандарт ГОСТ 12.1.006-08	110
23.2. Стандарт США, ANSI C95.1-1982	113
23.3. Стандарт ФРГ, DIN/57848	115
23.4. Указания ACGIH	118
23.5. Стандарт СЭВ, СТ СЭВ 01.873.08-84	119
23.6. Указания IRPA/INRIC	120
23.7. Характеристика польских правил и стандартов	124
24. Указания в области реалистической оценки экспозиции к действию электромагнитных полей	132
24.1. Исторический очерк	132
24.2. Основы определения ПДН электромагнитных полей очень низких и средних частот	134
25. Значение теоретических расчетов к биологическим исследованиям в определении ПДН электромагнитных полей	135



25.1. Общие установления	135
25.2. Установления в отдельных пределах частот электромагнитных полей	136
25.3. Рекомендации изменений ПДН и указания для определения ПДН электромагнитных полей	136
Литература	137
Резюме	152



1. WPROWADZENIE

Pola elektromagnetyczne (e-m) pochodzą ze źródeł naturalnych i sztucznych wytworzonych przez człowieka. W obecnych warunkach środowiskowych pola e-m osiągają wielką złożoność wynikającą z ogromnej i stale narastającej liczby źródeł oraz z ich zróżnicowania pod względem częstotliwości i modulacji. Z góry można odnieść się krytycznie do tak nie kontrolowanego zanieczyszczenia środowiska falami przenoszącymi energię i informację, lecz nie percepowanymi, pomijając niektóre wyjątki w przyrodzie.

Pola i fale e-m oznaczają stany energetyczne w przestrzeni wynikające z obecności lub przepływu ładunków elektrycznych mających energię potencjalną i kinetyczną. Sama nazwa pole/fala e-m wskazuje na elementy składowe tego rodzaju energii, tj. na składową elektryczną i na składową magnetyczną. Składowe te mają określony własny i wzajemny względem siebie układ przestrzenny oraz zwrot. Są to więc wielkości wektorowe, tj. wektor elektryczny $\vec{E}$ i wektor magnetyczny $\vec{H}$. Obecność tych wektorów w przestrzeni daje odpowiednio pole elektryczne E i pole magnetyczne H . Jeśli wektory E i H są oddzielnie lub razem prostopadłe do określonego kierunku, to odpowiednie pola oznacza się symbolami TEH, TE, TH, gdzie T jest akronimem słowa transverse (poprzeczny). Pola oznaczone symbolami E , H lub EH oznaczają, że odpowiednie wektory nie są prostopadłe do określonego kierunku. Takie rozróżnienie układu pól E i H winno się stosować stale, ale w praktyce nie przestrzega się tego tak ściśle. Dla uproszczenia i w tej monografii stosowane będą symbole $\vec{E}$ i $\vec{H}$ dla oznaczenia wektorów oraz symbole E i H dla oznaczenia odpowiednio pola elektrycznego i pola magnetycznego.

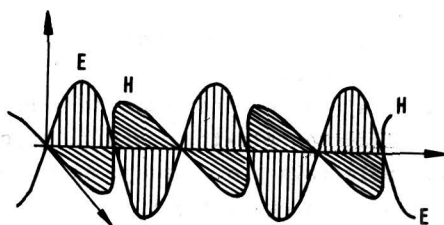
Pola e-m mają częstotliwości od ułamka Hz poprzez zerowe częstotliwości typowe dla stałych i quasi-stałych pól do gigaherców (GHz). Dla celów tej monografii przyjęto podział pól e-m na trzy główne podzakresy, tj. stałe, wolnozmiennne i szybkozmiennne. W ujęciu technicznym szybkozmiennne pola e-m określa się również terminem promieniowania niejonizującego. W odniesieniu do stałych i wolnozmiennnych pól e-m terminu tego nie stosuje się, gdyż pola tego zakresu częstotliwości nie przechodzą w promieniowanie w ścisłym tego słowa znaczeniu, tj. przechodzenie energii fali w energię innego rodzaju wzdłuż granicznej powierzchni pomiędzy dwoma ośrodkami.

W odniesieniu do pól/fal e-m szybkozmiennych obejmujących częstotliwości powyżej 300 Hz mówimy o polu/fali e-m, gdy mają ściśle zdeterminowane parametry w funkcji częstotliwości, oraz o polach/falach e-m, gdy mają zróżnicowane takie parametry, jak częstotliwość, modulacja częstotliwości i amplitudy, polaryzacja. Na podstawie takich cech pól e-m stosowane są w tej pracy następujące określenia według wcześniejszych sformułowań [Mikołajczyk, 1985]:

- 1) Proste pole e-m wynikające z niemodulowanej energii e-m określonej częstotliwości, tj. przenoszące tylko energię e-m.
- 2) Złożone pole e-m wynikające z modulowanej energii e-m w funkcji częstotliwości, amplitudy lub impulsowo, przez co zawarta jest w niej również informacja.

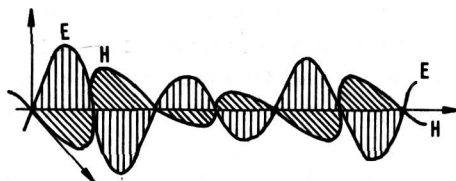
3) Kombinowane pole e-m oznaczające jednoczesne występowanie rozmaitych prostych, złożonych lub obu rodzajów takich pól e-m.

Złożoność i kombinacja pól e-m może być mało lub wielce urozmaicona w środowisku otaczającym i w środowisku pracy, ale działanie biologiczne tak złożonych, jak i kombinowanych pól e-m może być całkiem odmienne od działania prostych pól e-m (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Schemat ilustrujący układ fali e-m

Wektory E i H są do siebie prostopadłe w każdym punkcie przebiegu fali, węzły i strzałki wektorów znajdują się w tych samych miejscach



Rys. 2. Fala e-m o zmodulowanej amplitudzie wektorów E i H

Jeśli rozważyć tylko dwa podstawowe sposoby działania pól e-m na obiekty biologiczne, tj. działanie termiczne prowadzące do zwiększenia ciepłoty w wyniku pochłaniania energii e-m i zamiany tej energii na ciepło i działanie nietermiczne prowadzące do teoretycznie przewidywanych lub mierzalnych zmian czynnościowych, to powtarzalność wyników otrzymano w odniesieniu do pierwszego sposobu działania, natomiast w odniesieniu do wyników przypisywanych nietermicznemu działaniu pól e-m nie uzyskano powtarzalnych wyników lub powtórzenie uzyskiwano tylko w pewnym przybliżeniu. Taka sytuacja poparta wieloletnim własnym doświadczeniem pozwala postawić następujące tezy:

1. Niezależnie od termicznych i nietermicznych sposobów działania pól e-m każde pole e-m (tab. 1) powoduje zmiany biologiczne in vivo przez układy regulacyjne: nerwowy, hormonalny, łącznotkankowy (tab. 2).

2. Dowolna zmiana jakiegokolwiek parametru lub charakterystyki danego pola e-m (tab. 3) wpływa na zmianę jego działania nietermicznego. Powtórzenie wyników badań jest możliwe w ściśle takich samych warunkach ekspozycji, miejsca i czasu. W praktyce oznacza to, że eksperymenty powinny być przeprowadzone na więcej niż jednej grupie zwierząt jednocześnie oraz że powinny być powtórzone co najmniej trzykrotnie, ażeby można wyciągnąć wiarygodne wnioski.

Podane tezy mają potwierdzenie faktyczne w niesłychanej rozbieżności wyników biologicznych badań doświadczalnych oraz implikują kompromisowość podejścia do problematyki higienicznej oceny pól e-m.

T a b e l a 1

Fale/pola e-m z uwzględnieniem częstotliwości, długości fali, energii fotonu i nazw pasm

Pasmo fal	Częstotliwość	Długość fali (m)	Energia fotonu (eV)
Bardzo długie	Substacjonarne	0,3 Hz	
	Stałe	0 Hz	
	Quasi-stacjonarne		
		3 Hz	10^7
	ELF (krajcowo mała częstotliwość)		10^{-13}
		300 Hz	10^6
	ULF (ultramała częstotliwość)		10^{-12}
		3 kHz	10^5
	VLF (bardzo mała częstotliwość)		10^{-11}
		30 kHz	10^4
Długie	LF (mała częstotliwość)		10^{-10}
Średnie	MF (średnia częstotliwość)	300 kHz	10^3
Krótkie	HF (duża częstotliwość)	3 MHz	10^2
Ultrakrótkie	VHF (bardzo duża częstotliwość)	30 MHz	10^1
Mikrofaie			10^{-7}
	decymetrowe	300 MHz	1
			10^{-6}
	centymetrowe	3 GHz	10^{-1}
			10^{-5}
Mikrofaie	milimetrowe	30 GHz	10^{-2}
			10^{-4}
		300 GHz	10^{-3}
			10^{-3}

T a b e l a 2

Cechy żywego organizmu
istotne w aspekcie działania pól/fal e-m

Lp.	Wyszczególnienie
1	Masa o różnej gęstości w poszczególnych częściach organizmu i wykazująca parametry dielektryczne różniące się ilościowo
2	Ramowa konfiguracja przekroju w płaszczyznach równoległych do długiej osi organizmu
3	Określone właściwości dielektryczne i paramagnetyczne tkanek i materiałów biologicznych (przenikalność elektryczna i magnetyczna – stratność, oporność właściwa – przewodność)
4	Budowa członowa: głowa, tułów, kończyny (wypustki) jako system antenowy asymetryczny w układzie trzech współrzędnych prostopadłych
5	Budowa warstwowa: skóra, tłuszcz, mięśnie, błony, kości (powodująca załamania i odbicia fal na pograniczu warstw)
6	Składniki wykazujące zjawiska piezoelektryczne, fononowe, fotonowe, rezonansowe

Lp.	Wyszczególnienie
7	Przebiegi elektryczne będące wyrazem ruchu jonów, metabolizmu i funkcji (potencjały, EKG, EEG, EMG)
8	Układy koordynujące i scalające: nerwowy, hormonalny, łącznotkankowy
9	Podatność do akumulacji ładunków elektrostatycznych (zwłaszcza na powierzchni)
10	Układ termodynamiczny z określonymi granicami tolerancji
11	Brak swoistych receptorów (reaktorów) dla fal e-m, z wyjątkiem nielicznych gatunków
12	Podatność całego organizmu na działanie pól/fal e-m oznaczająca nieskończoną liczbę reaktorów (receptorów) energii e-m

T a b e l a 3

Charakterystyka pól/fal e-m

Lp.	Wyszczególnienie
I	Parametry fizyczne pól/fal e-m: - częstotliwość f (Hz, kHz, MHz, GHz) - prędkość rozchodzenia c (3×10^8 m/s w próżni) - długość fali λ (km, m, cm, mm) - natężenie: $E = V/m$, $H = A/m$, $P = W/m^2$
II	Przebieg i uformowanie fali i pola e-m: - wzajemna prostopadłość i symetryczność wektorów E i H - polaryzacja: liniowa, eliptyczna, kołowa - pole pulsujące, pole przejściowe, pole promieniowania - modulacja: - fala niemodulowana – nośnik energii - fala po modulacji częstotliwości lub amplitudy – – nośnik energii i informacji - fala modulowana impulsowo – energia w impulsie - wielokrotnie większa niż energia średnia
III	Złożoność fali/pola e-m: a) jedna częstotliwość ściśle określona b) jedna częstotliwość zmienna w pewnym przedziale c) liczne takie same ściśle określone częstotliwości d) liczne takie same częstotliwości zmienne w pewnym przedziale e) różne częstotliwości ściśle określone f) różne częstotliwości zmienne w pewnym przedziale

Lp.	Wyszczególnienie
IV	Oddziaływanie na obiekt:
	1) sprzężenie pomiędzy źródłem pola/fali e-m i obiektem
	2) działanie pola/fali e-m:
	a) przenikanie bezstratne
	b) odbicie bezstratne i zmiana kąta padania
	c) pochłanianie częściowe lub całkowite:
	- przepływ lub indukcja prądu w przewodnikach i półprzewodnikach
	oraz prąd przesunięcia w dielektrykach
	- transformacja energii e-m na ciepło
	- zakłócenia funkcjonalne, molekularne, atomowe

2. UWAGI OGÓLNE

W obrębie kuli ziemskiej rozróżniono 4 warstwy: 1) skorupę ziemską grubości pod ładami 30-50 km (gęstość $2,4 - 3 \text{ g/cm}^3$); 2) płaszcz ziemski grubości około 2900 km (gęstość $3 - 6 \text{ g/cm}^3$); jądro Ziemi, składające się z płynnych metali, głównie żelaza, grubości 2100 km (gęstość $10 - 14 \text{ g/cm}^3$); 4) wewnętrzne jądro Ziemi o promieniu około 1400 km (gęstość około 17 g/cm^3). Z ruchami płynnego metalicznego jądra Ziemi związane jest naturalne pole magnetyczne Ziemi. Bieguny magnetyczne odchylone są od osi obrotu Ziemi, tj. biegun magnetyczny północny znajduje się na szerokości geograficznej $+79^\circ$ i oś magnetyczna tworzy z osią obrotu Ziemi kąt 11° (jest to tzw. deklinacja magnetyczna). Nad powierzchnią Ziemi odróżniono: 1) troposferę zawierającą $78\% \text{ N}_2$, $21\% \text{ O}_2$, $1\% \text{ Ar}$, domieszki He i Ne oraz zmienne ilości pary H_2O i CO_2 ; troposfera sięga do wysokości 10-11 km nad biegunami i 14-17 km w strefie zwrotnikowej Ziemi; 2) stratosferę, do wysokości 55 km, przy czym do wysokości 25 km temperatura wynosi -55°C , a następnie zwiększa się do 0°C na wysokości 55 km; tutaj występują cząstki O_3 o największym stężeniu na wysokości 20-30 km, które pochłaniają promieniowanie UV 300 nm; 3) mezosferę, do wysokości 80 km, gdzie temperatura wynosi -90°C na wysokości 80 km; 4) termosferę, do wysokości około 1000 km, zawierającą warstwy zjonizowane przewodzące elektryczność (stąd również nazwa jonosfera); 5) metasferę, do wysokości 1000-1500 km o stałej temperaturze; 6) protosferę, powyżej 1500 km, w której głównym składnikiem są protony. W metasferze i protosferze występuje pas promieniowania pierścieniowego Ziemi.

Obszar w otoczeniu Ziemi stanowiący naładowane elektrycznie cząstki nazwane magnetosferą ziemską. Do obszaru przyciągania Ziemi dochodzą naelektryzowane cząstki z dwóch źródeł: a) promieniowania kosmicznego złożonego z elektronów, protonów i częściowo z jąder ciężkich pierwiastków pochodzącego z przestrzeni wszechświata; b) wiatru słonecznego stanowiącego plazmę słoneczną na-

ładowanych cząstek. W magnetosferze Ziemi występują następujące pierścienie radiacyjne: 1) pierścień radiacyjny wewnętrzny zawierający protony i elektrony o energii 10^8 eV na wysokości od około 2400 do 5000 km; 2) pierścień radiacyjny zewnętrzny na wysokości 12 000 – 20 000 km zawierający elektrony i protony o energii przekraczającej 10^8 eV; 3) pierścień radiacyjny sięgający 35 000 – 60 000 km zawierający elektrony o energii 200 eV [Rybka, 1983].

Planeta Ziemia ma własne pole magnetyczne wynikające z procesów energetycznych wewnątrz Ziemi i w jej dalszym otoczeniu. W sumie Ziemia jest gigantycznym magnesem, którego oś jest odchylona o pewien kąt od osi jej obrotu. Biegun magnetyczny północny znajduje się w pobliżu miejscowości Thule na Grenlandii, a biegun magnetyczny południowy jest w pobliżu radzieckiej stacji Wostok na Antarktydzie. Przyjmuje się, że główne pole magnetyczne Ziemi powstaje na zasadzie samowzbudnego procesu dynamicznego. Na głębokości ponad 2900 km znajduje się jądro Ziemi z płynnego materiału metalicznego. Pod wpływem naturalnych rozpadów radioaktywnych powstają ruchy termiczne płynnej masy jądra Ziemi, powodując wytwarzanie prądu elektrycznego. W przypadku określonego ukształtowania ruchu konwekcyjnego płynnego jądra Ziemi związany z tym ruchem prąd elektryczny oddziałuje na pierwotne słabe pole magnetyczne, powodując jego wzmocnienie [Baumjohann i Harendel, 1987].

Linie sił dwubiegunowego pola magnetycznego na powierzchni Ziemi ulegają zakrzywieniu wraz z wysokością kilku promieni kuli ziemskiej, przy czym od strony słonecznej (dziennej) ulegają zagęszczeniu pod wpływem kinetycznego ciśnienia plazmy słonecznej, tzw. wiatru słonecznego, a od strony księżycowej (nocnej) przyjmują układ podłużny tzw. ogona. Pole magnetyczne Ziemi stanowi barierę przeciw wnikaniu plazmy słonecznej do magnetosfery, której grubość wynosi około 100 km. Powyżej tej warstwy znajduje się magnetopauza. Tym niemniej wzdłuż linii pola magnetycznego w pobliżu biegunów magnetycznych Ziemi wnika do atmosfery na wysokości 100 – 1000 km około 10^{10} GJ/s na powierzchnię przekroju Ziemi; energia ta pochodzi z kinetycznej energii plazmy słonecznej, wywierając wpływ na zjawiska pogodowe na Ziemi. Wymienione cechy układu linii pola magnetycznego umożliwiają także docieranie promieniowania kosmicznego do powierzchni Ziemi, co ma określone następstwa biologiczne.

Zgodnie z równaniem Maxwella o nieodzownym powiązaniu pola magnetycznego z prądem elektrycznym ($\text{div} \cdot \mathbf{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$) dwubiegunowe pole magnetyczne w magnetosferze indukuje prąd elektryczny, którego natężenie osiąga wiele milionów amperów. W wyniku kompresji pola magnetycznego od strony Słońca powstaje wieloprzestrzenny przepływ prądu prostopadle do linii pola magnetycznego, tj. tzw. prąd magnetopauzy. W ogonie magnetosfery indukowany jest prąd ogonowy i tzw. prąd warstwy neutralnej, przy czym obydwa te prądy są wzajemnie powiązane i tworzą układ na kształt litery θ (theta). W magnetosferze w odległości 3 – 5 promieni Ziemi przepływa równolegle do linii sił pola i układający się następnie w kierunku zachodnim tzw. prąd pierścieniowy powstający z przenoszenia protonów, które są uwięzionymi w polu magnetycznym cząstkami o energii kilku dziesięciu keV. W jonosferze występuje prąd spowodowany wiatrem jonosferowym, czyli tzw. prąd układu S_q z równikowym elektrodzetem (elektrojet = strumień

elektryczny), oraz inne układy prądowe, w których prądy przepływają nie tylko prostopadle do linii sił pola magnetycznego, ale także częściowo równolegle do tych linii. Je prądy równoległe do linii sił pola magnetycznego wiążą prądy w magnetosferze w jej warstwach granicznych z prądami w jonosferze biegunowej oraz umożliwiają wymianę energii między tymi regionami. Tutaj znajduje się generator w warstwach granicznych magnetosfery i czerpie swoją energię z energii kinetycznej napływającego wiatru słonecznego. Natomiast jonosfera spełnia rolę gigantycznego oporu przeciążeniowego, w którym przez ciepło Joule'a energia rzędu wielu setek GW może być sprowadzona do energii cząsteczkowej. Ten trójwymiarowy układ prądów zawierający prądy płynące równoległe i prostopadle w jonosferze i magnetosferze do pola magnetycznego Ziemi stanowi układ biegunowego elektrodzetu. W układzie tym występują rozmaite przesunięcia energii zależne od pory dnia powodujące pola elektryczne o natężeniu 10-50 mV/m i powierzchniowe natężenia prądu około 0.5 A/m lub 1 A/m. W czasie burz magnetycznych trwających wiele dni i powodujących silne zakłócenia pola magnetycznego Ziemi dochodzi do magnetosfery [Baumjohann i Harendel, 1987].

Od 1974 r. wiadomo, że fale bardzo małej częstotliwości (VLF) pochodzące z linii elektrycznych wysokiego napięcia przenikają do magnetosfery i silnie oddziałują z elektronami energetycznymi (promieniowanie korpuskularne) wychwytywanymi w polu magnetycznym Ziemi. W wyniku takiego oddziaływania falowo-cząsteczkowego natężenie fal może zwiększyć się 1000-krotnie lub więcej w czasie przechodzenia w obszarze wymienionego oddziaływania [Park i Helliwell, 1978].

Przetworniki prądu i maszyny elektryczne o zbyt dużej tolerancji parametrów elektrycznych wprowadzają wyższe częstotliwości harmoniczne do środowiska w stosunku do częstotliwości podstawowej 60 Hz lub 50 Hz w liniach wysokiego napięcia. Linie przenoszące tego typu prądy harmoniczne wypromieniowują fale radiowe szerokiego zakresu częstotliwości, które wnikają do jonosfery i kierowane są przez pole magnetyczne Ziemi do obszaru oddziaływania z cząsteczkami w magnetosferze równikowej. W ten sposób omawiane fale ulegają silnemu wzmocnieniu i w pewnych warunkach mogą również zapoczątkować emisję nowych fal o znacznie większym natężeniu niż natężenie fal wejściowych. Tak więc magnetosfera jest podobna do względnie stabilnego wzmacniacza, który niekiedy ulega pobudzeniu i zaczyna działać jak oscylator [Park i Helliwell, 1978; Park i Chang, 1978]. Wypromieniowywanie fal harmonicznych z linii wysokiego napięcia nasila się w czasie nagłego zapoczątkowania burzy geomagnetycznej [Hayashi i współaut., 1978]. Inne obserwacje i rozważania wskazały na to, że promieniowanie z linii wysokiego napięcia nie odgrywa ważniejszej roli w nieadiabetycznej dynamice elektronów w pasie promieniowania Ziemi [Thorne i Tsurutani, 1979].

W doskonałym przybliżeniu pole magnetyczne Ziemi można porównać do pola jednolicie namagnesowanej kuli, tj. do tzw. modelu scentrowanego dipola (Centered dipol). Os takiego dipola ma położenie $78,7^{\circ}\text{N}$ i $289,5^{\circ}\text{E}$ oraz przemieszcza się o $0,00^{\circ}\text{N}$ i $-0,06^{\circ}\text{E}$ rocznie. Natężenie linii sił tego dipola mierzy się wielkością MR^{-3} , w której M oznacza moment dipolowy, a R średni

promień Ziemi. W odniesieniu do wymienionego powyżej modelu wielkość MR^{-3} wynosi 30 701 nT i maleje o 28,8 nT rocznie. Jeśli ta tendencja utrzyma się, to kierunek zmian pola odwróci się około 2230 AD. Zmiany te zależne są od przesuwania dipola magnetycznego centrum Ziemi. Bieguny magnetyczne głębokie rzutowane są na powierzchnię Ziemi w punktach, w których linie sił są pionowe. Według przyjętego modelu północny biegun głęboki magnetyczny znajduje się na wyspie Bathurst (76,1°N, 259,5°E) i przesuwa w kierunku wschodnim z prędkością 5 km rocznie. Południowy biegun magnetyczny głęboki zajmuje położenie (65,6°S i 139,6°E) około 120 km od wybrzeża Adelie Land i przesuwa się w kierunku północno-wschodnim ku Nowej Zelandii z prędkością 5,5 km rocznie. Przesuwanie się biegunów magnetycznych Ziemi zmienia kierunek okresowo w skali setek lat [Harwood i Malin, 1976]. W wielu miejscach na Ziemi występują w czasie rozmaite anomalie składowych pionowej i horyzontalnych pola magnetycznego Ziemi, jak na przykład w północnej Anglii i w południowej Szkocji [Banks i współaut., 1983]. Anomalie w natężeniu pola magnetycznego Ziemi są wykorzystywane do sterowania rakietami samonaprowadzającymi na cele na powierzchni Ziemi.

Pole magnetyczne Ziemi można podzielić na: 1) pole o stałym natężeniu, nie wykazującym istotnych zmian w okresach rocznych; 2) pole o zmiennym natężeniu, którego wielkość zależy od czynników zewnętrznych, a przede wszystkim od układu prądów elektrycznych w jonosferze i w przestrzeni otaczającej Ziemię. Moment magnetyczny Ziemi wynosi $8,1 \times 10^{25}$ cgs ($8,1 \times 10^{19}$ kms) [Dubrov, 1978]. Maksymalne natężenie pola magnetycznego Ziemi dochodzi do 0,7 Oe, ale zależnie od szerokości geograficznej zmienia się w przedziale 0,3 – 0,6 Oe, co jest równoważne wartościom 0,3 – 0,6 G lub 0,03 – 0,06 mT i 23,88 – 47,76 A/m (tab. 7).

W atmosferze Ziemi występują poza polem magnetycznym elektryczność statyczna wynikająca z obecności jonów kilku wielkości będących nośnikami ładunków ujemnych lub dodatnich, pole elektryczne i promieniowanie elektromagnetyczne rozmaitych zakresów częstotliwości, tj. promieniowanie jonizujące ze źródeł radioaktywnych, promieniowanie ultrafioletowe, światło widzialne, promieniowanie podczerwone oraz promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach od ułamka Hz do wielu GHz. Nadto do Ziemi dociera promieniowanie kosmiczne z przestrzeni międzygwiazdnych. Źródłem większości wymienionych rodzajów promieniowania i jonów jest Słońce, którego całkowita moc promieniowania e-m jest rzędu 10^{26} W.

Pole elektryczne Ziemi zmienia się w zależności od szerokości geograficznej, od pór roku, pory dnia i od sytuacji pogodowych. W strefie umiarkowanej natężenie pola elektrycznego Ziemi wynosi 100 – 130 V/m na wysokości 1 m nad powierzchnią Ziemi w kierunku pionowym i zmniejsza się wraz z wysokością tak, że na wysokości około 9 km wynosi kilka V/m. Po wybuchach na Słońcu oraz podczas burz występują znaczne zmiany tak pola magnetycznego, jak i pola elektrycznego Ziemi.

Trwają od wielu lat badania metrologiczne dotyczące występowania w atmosferze Ziemi naturalnych pól i promieniowania e-m o częstotliwościach od ułamka Hz do wielu GHz. Udokumentowano występowanie promieniowania e-m zakresów



1 – 25 Hz, 40 Hz – 2 kHz, 2 – 12 kHz, a szczególnie regularnie występuje pole e-m o stałej częstotliwości 10 Hz, która jest częstotliwością własną rezonatora kulisto-przestrzennego, jaki tworzy Ziemia i jonosfera [Schumann i König, 1954]. Opisano także promieniowanie e-m o długości fali 30 000 000 km, tj. o częstotliwości 0,01 Hz. W przypadku wybuchów na Słońcu do Ziemi dociera promieniowanie e-m o częstotliwościach 80 – 200 MHz. W badaniach radioastronomicznych zainteresowanie dotyczy podstawowego promieniowania mikrofalowego kosmicznego uważanego za pozostałość po początkowym wybuchu rozpoczynającym istnienie wszechświata przed 18 000 000 lat. Przeprowadzone pomiary dotyczą fal o długościach od 75 cm do 0,5 mm [Wilson, 1979].

Źródłem niektórych zakresów promieniowania e-m są obiekty rozmieszczone w układzie słonecznym oraz w głębi wszechświata, jak np. gwiazdy supernowe, oraz kwazary, czyli radiogwiazdy (nazwa pochodzi od słów angielskich quasi-stellar radio-sources). W atmosferze Ziemi występują rozmaite szумы elektromagnetyczne różnych zakresów częstotliwości. Szумы takie oraz zakłócenia pola elektrycznego, pola magnetycznego i promieniowania e-m w atmosferze Ziemi, w sensie zwiększenia ich natężenia, stanowią często poważną przyczynę zakłóceń łączności radiowej i telewizyjnej oraz wpływają na zmianę zachowania się zwierząt i samopoczucia ludzi.

Do naturalnych źródeł promieniowania e-m należy zaliczyć również istoty żywe z człowiekiem na czele. Istoty te emitują promieniowanie podczerwone (ciepłotne), promieniowanie z zakresu ultrafioletu, np. promieniowanie mitogenetyczne, opisane przez radzieckiego uczonego Guriwczę i występujące podczas podziałów komórek roślin i zwierząt, oraz promieniowanie małych częstotliwości w wyniku bioelektrycznej funkcji rozmaitych narządów, jak np. mózgowia, serca, mięśni. Prądy i pola e-m powstające w obiektach biologicznych mają bardzo małe natężenia i do ich pomiarów niezbędne są bardzo czułe przyrządy pomiarowe.

Od czasu stwierdzenia przez H. Hertza w 1887 r., że zwykły przewodnik dwubiegunowy (dipol) włączony w obwód prądu zmiennego może być źródłem promieniowania e-m, rozpoczął się rozwój sztucznych źródeł generujących takie promieniowanie, świadomie konstruowanych i wykorzystywanych przez człowieka. Po początkowym niekontrolowanym rozwoju urządzeń generujących energię e-m do celów telekomunikacji, lecznictwa i zastosowań przemysłowych okazało się sprawą oczywistą, że doprowadzi to w sposób nieunikniony do niekompatybilności takiego stopnia, iż łączność radiowa stanie się niemożliwa. Postanowiono zatem uporządkować w skali międzynarodowej dalszy rozwój i wykorzystanie energii e-m tak, aby rozmaite urządzenia generujące nie zakłócały przede wszystkim łączności radiowej, a więc pojawiło się usilne dążenie do kompatybilności energii i fal e-m o odpowiednim przeznaczeniu. Powołano międzynarodowe organizacje i stowarzyszenia, których zadaniem było uporządkowanie problematyki urządzeń generujących pola elektromagnetyczne. Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna (ITU – International Telecommunication Union), działając poprzez wyspecjalizowane komitety i grupy robocze, ustalała stopniowo rozmaite przepisy radiowe, które w zwartej formie zostały wydane w 1982 r., a następnie były rewidowane i nowelizowane



w latach 1985-1986. Przepisy obejmują takie działy, jak terminologię łącznie z podziałem częstotliwości fal e-m, ogólne reguły przydziału i zastosowania konkretnych częstotliwości fal e-m do określonych celów, tj. radio, lecznictwa i przemysłu, wytyczne administracyjne obowiązujące w przypadku uruchomienia nowych stacji telekomunikacyjnych oraz wykaz wydanych uprzednio przepisów. W ten sposób każdy kraj nie może dowolnie wykorzystywać jakichkolwiek częstotliwości fal e-m, ale musi korzystać z częstotliwości przydzielonych do określonego rejonu i kwartału kuli ziemskiej, co odnosi się tak do naziemnych, jak i do satelitarnych urządzeń generujących. W wykazie z 1982 r. rozdysponowania częstotliwości fal e-m ITU nie przypisała dotychczas szczegółowo fal e-m o częstotliwości poniżej 9 kHz i w przedziale 275 – 400 GHz. Ustalono, że fale e-m o częstotliwości poniżej 9 kHz nie powodują zakłóceń łączności radiowej na falach o większych częstotliwościach [Radio Regulations, 1982].

Pod względem kompatybilności elektromagnetycznej naturalne środowisko Ziemi znajduje się pod coraz większym naporem pól e-m pochodzących ze źródeł sztucznych. Pożyteczne będzie przytoczenie kilku informacji ogólnych o wzajemnym oddziaływaniu pól e-m [Duffin, 1968]. Jeśli występują więcej niż dwa obwody, to oddziaływanie sił tych obwodów zachodzi według zasady superpozycji (nakładania się). Zasada ta odnosi się do wszystkich oddziaływań stałych elektrycznych i magnetycznych. Indukcja magnetyczna B stwarza wektorowe pole magnetyczne. Materiały magnetyczne cechują się magnetyzacją M wyrażającą moment magnetyczny dipolowy na jednostkę objętości. Magnetyzację mogą powodować pola magnetyczne z zewnątrz lub może ona być niezależna od takich pól w materiałach ferromagnetycznych i ferrimagnetycznych. Obok zasady superpozycji i prawa Coulomba (siła działająca pomiędzy dwoma ładunkami) podstawowe znaczenie w elektryczności i magnetyzmie ma prawo zachowania ładunku. Zachowanie ładunku obowiązuje zawsze niezależnie od tego, czy prąd występuje w wolnej przestrzeni, czy w przewodnikach. Oznacza to, że każdemu zmniejszeniu całkowitego ładunku w danej objętości musi towarzyszyć równy odpływ ładunku przez powierzchnię graniczną. Wynika z tego, że ilościowe zmniejszenie się ładunku w objętości jest równe całkowitemu prądowi płynącemu na zewnętrznej powierzchni ograniczającej tę objętość. W nazwie prądu wolnozmiennego termin wolnozmienny oznacza, że warunki przepływu są efektywnie stałe lub quasi-stałe, tj. że w dowolnych odciinkach czasu zmiany są wystarczająco powolne dla ośrodków przewodzących i izolujących, aby wykazywać równowagę wartości wszystkich zmieniających się wielkości.

3. CHARAKTERYSTYKA FIZYCZNA PÓL E-M

Pola elektryczne (E), magnetyczne (H) i elektromagnetyczne (e-m) są wynikiem obecności i oddziaływania ładunków elektrycznych o określonej energii potencjalnej i kinetycznej w przestrzeni. W warunkach statycznych pola E obowiązują prawo Coulomba wyrażone równaniem

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

W warunkach statycznych i kinetycznych pól e-m obowiązują podstawowe równania Maxwella

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\bar{\rho}}{\epsilon}$$

teorem Gaussa

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0$$

teorem Gaussa

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

prawo indukcji

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{I} + \frac{\epsilon \partial \vec{E}}{\partial t}$$

prawo pola H (teorem Ampera)

$$\vec{I} = \oint \vec{E}$$

prawo Ohma

$\vec{E}$ wektor pola elektrycznego

$\vec{H}$ wektor pola magnetycznego

ϵ przenikalność elektryczna (tzw. stała dielektryczna)

μ przenikalność magnetyczna

$\oint$ przewodnictwo

$\vec{I}$ prąd elektryczny

$\bar{\rho}$ gęstość powierzchniowa ładunku.

Jeśli wytworzy się (lub jeśli zostanie nadany) taki układ wektora $\vec{E}$ i wektora $\vec{H}$, że będą one do siebie wzajemnie prostopadłe i zgodne w fazie, to od tego miejsca w przestrzeni energia e-m będzie przenoszona w postaci fali promieniowania e-m. Promieniowanie e-m, którego energia rozchodzi się w kwantach, charakteryzują następujące wielkości fizyczne:

- długość fali (λ , lambda) wyrażana w metrach lub w jednostkach pochodnych;
- częstość (f) wyrażana w Hz lub w cyklach/s; pola wolnozmiennie obejmują cykliczne zmiany o częstościach od 3 Hz do 100 Hz, a pola szybkozmiennie od około 400 GHz, natomiast pola e-m w najszerszym znaczeniu obejmują promieniowanie od ułamka Hz;
- prędkość propagacji (c) wyrażana w metrach lub w jednostkach pochodnych na sekundę; Hertz wykazał, że w próżni oraz w przybliżeniu w powietrzu prędkość propagacji promieniowania e-m jest równa prędkości światła ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s);
- okres (T) oznaczający czas przebiegu jednej zmiany amplitudy; energia kwantu (ϵ w eV) promieniowania e-m omawianego przedziału częstości jest zbyt mała do spowodowania jonizacji cząstek powietrza i wody, stąd też promieniowanie e-m jest nazywane potocznie promieniowaniem niejonizującym;
- współczynnik proporcjonalności, czyli stała Plancka ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.).

Pomiędzy podanymi wielkościami zachodzą następujące zależności w odniesieniu do fali promieniowania e-m

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{oraz} \quad T = \frac{1}{f}, \quad \text{stąd} \quad \lambda = c \cdot T \quad \text{i} \quad \epsilon = h \cdot f.$$

Odległość od źródła promieniowania e-m ma istotne znaczenie dla układu wektorów $\vec{E}$ i $\vec{H}$ oraz dla wielkości natężeń pola E i H . Ze względów praktycznych, głównie do celów pomiarowych i do oceny działania na obiekty biologiczne, rozróżnia się, idąc od źródła promieniowania, następujące obszary pól e-m:

1. Pole e-m pulsujące zajmujące przestrzeń o $r = 2\lambda$ od źródła. W przestrzeni tej indukcja e-m decyduje o wartościach pól E i H, przy czym nie ma jeszcze tutaj symetrycznego układu wektorów tych pól. Wynika stąd praktyczny wniosek, że do oceny natężenia pola e-m pulsującego należy mierzyć pole E w V/m i pole H w A/m (w przypadku pola H mierzy się w istocie wielkość indukcji magnetycznej B, ale pomiędzy B i H zachodzi zależność $B = \mu_0 H$, gdzie μ_0 oznacza przenikalność magnetyczną próżni; w odniesieniu do próżni $\mu_0 = 1$, a do powietrza $\mu = 1,00024$ i stąd przyjmuje się, że w próżni i w powietrzu $B = H$). Pomiar natężenia pola H w A/m jest wygodniejszy ze względów technicznych.

2. Pole bliskie promieniowania e-m zajmujące przestrzeń w przedziale $2\lambda < r < 2D^2/\lambda$ od źródła, przy czym D oznacza największy rozmiar elementu promieniującego (zazwyczaj anteny). W polu bliskim promieniowania e-m tak indukcja e-m, jak i promieniowanie e-m decydują w równym stopniu o wartościach natężeń pól E i H, gdyż zaczyna tworzyć się symetryczny układ wektorów składowych pola e-m. Natężenie pola e-m można tutaj określać przez pomiar pola E w V/m, pola H w A/m i gęstości strumienia energii P w W/m².

3. Pole dalekie promieniowania e-m zajmujące przestrzeń o $r > 2D^2/\lambda$ od źródła. W polu dalekim promieniowania e-m występuje ścisła symetria układu wektorów E i H tworzących falę e-m rozchodzącą się według wektora Poyntinga $\vec{P} = \vec{E} \cdot \vec{H}$. W wolnej przestrzeni (a w przybliżeniu także w powietrzu) $\frac{E}{H} = Z_0$, gdzie Z_0 oznacza impedancję falową tego ośrodka (według uogólnionego prawa Ohma). Impedancja Z_0 wolnej przestrzeni i powietrza (w przybliżeniu) wynosi $120\pi\Omega = 377\Omega$. Tak więc w przestrzeni dalekiego pola promieniowania e-m natężenie pola e-m można określić na podstawie pomiaru tylko pola E w V/m, tylko pola H w A/m lub gęstości strumienia energii P w W/m². Z wartości takich pomiarów można obliczyć inne wartości natężenia pola na podstawie podanej powyżej zależności impedancyjnej.

Polaryzacja fali e-m polega na zmianach kierunku i amplitudy wektora E w danym punkcie przestrzeni, a tym samym na zmianach płaszczyzny polaryzacji tej fali mającej wektor E i kierunek propagacji. Jeśli ta płaszczyzna polaryzacji jest stała, to mówimy o polaryzacji liniowej, która może być pionowa, gdy wektor E jest stale skierowany pionowo, lub pozioma, gdy wektor E jest stale skierowany poziomo. Jeśli płaszczyzna polaryzacji obraca się, to mówimy o obrotowej polaryzacji eliptycznej lub kołowej zależnie od postaci krzywej wykreślonej przez wierzchołek wektora E w funkcji czasu (Duffin, 1968; Piekara, 1972; Vautrin i współaut., 1978).

Wymienione powyżej zależności kwantowo-falowe i energetyczne pól i promieniowania e-m wynikają z podstawowych praw elektryczności i z równań Maxwella, przy czym zależności te mają zastosowanie do ośrodków ciągłych charakteryzujących się odpowiednimi wartościami przenikalności elektrycznej ϵ (stałej dielektrycznej), przenikalności magnetycznej μ i przewodności δ .

W praktycznym, przemysłowym wykorzystaniu energii e-m impedancja równoważna w bezpośredniej przestrzeni otaczającej źródło pola e-m może mieć różne wartości zależnie od zadanego napięcia U i natężenia prądu I w obwodach elek-

trycznych danego źródła. Do celów pomiarowych rozróżnia się: 1) pole wielkiej impedancji o $E : H > 100 \Omega$, występujące w polu dalekim promieniowania e-m i w polu indukcji, gdy w obwodzie $U : I > 1000 \Omega$; 2) pole średniej impedancji o $0,01 \leq E : H \leq 100 \Omega$, występujące w polu bliskim promieniowania, gdy w obwodzie jest $0,01 \leq U : I \leq 100 \Omega$; 3) pole małej impedancji o $E : H \leq 0,01 \Omega$, występujące w strefie bliskiej promieniowania, gdy w obwodzie $U : I \leq 0,01 \Omega$ [PN-77/T-01025].

W nawiązaniu do przedstawionych powyżej zależności fizycznych wektorów $\vec{E}$ i $\vec{H}$ należy przedstawić zwięźle podstawy działania pola magnetycznego i pola elektrycznego na materię [Vautrin i współaut., 1978]. Rozróżnia się: nagrzewanie indukcyjne powodowane działaniem pola magnetycznego i nagrzewanie dielektryczne powodowane działaniem pola elektrycznego.

4. NAGRZEWANIE INDUKCYJNE

W przewodniku umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym indukowane są prądy, które są zamieniane na ciepło w wyniku efektu Joule'a. Strumień indukcji Φ wywołuje siłę elektromotoryczną u , której wartość chwilowa wynosi

$$u = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Strata energii w danej objętości jest proporcjonalna do wyrażenia

$$\frac{u^2 \text{ skuteczne}}{r},$$

gdzie: r — oznacza opór materiału przewodzącego.

W przewodniku poddanym działaniu pola magnetycznego prądu zmiennego rozmieszczenie prądu nie jest równomierne, lecz gęstość prądu maleje wykładniczo w kierunku od zewnątrz do środka tego przewodnika, czyli prąd przepływa w określonej warstwie przewodnika wyznaczającej głębokość penetracji, na której gęstość prądu jest stała i równa gęstości prądu w warstwie wierzchniej, tj.

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}},$$

gdzie: d — grubość warstwy, w której jest stała gęstość prądu,

ρ — opór właściwy (rezystywność),

μ — przenikalność magnetyczna,

f — częstość.

W warstwie D , przez którą przepływa około 63% całej ilości prądu $(1 - \frac{1}{e})$, następuje około 87% stratności cieplnej proporcjonalnie do $(1 - \frac{1}{e^2})$, gdzie e oznacza podstawę logarytmów naturalnych. Podany efekt termiczny zwany jest efektem naskórkowym lub efektem Kelvina.

Do opisu nagrzewania materiału poddanego działaniu pola H często stosuje się wyrażenie

$$\Delta T = K \frac{\pi^2}{\rho} I_3^2 \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot V,$$

gdzie: ρ – opór właściwy,

I_3 – grubość danej objętości,

f – częstość prądu,

B_M – indukcja maksymalna,

V – objętość materiału,

ΔT – przyrost temperatury materiału,

K – stała.

W istocie obliczenie rzeczywistej stratności energii w przewodniku wymaga obliczeń na podstawie równań Maxwella, do czego wykorzystuje się funkcje Bessela lub funkcje Kelvina. W przypadku gdy $\frac{r}{d} > 5$, tzn. gdy istotną rolę odgrywa efekt naskórkowy, nagrzewanie następuje wg wyrażenia

$$T = K \frac{2H_M^2}{r} \pi \mu f \rho.$$

Wyrażenie to oznacza, że nagrzewanie narasta proporcjonalnie do kwadratu natężenia pola magnetycznego maksymalnego (H_M) i do pierwiastka kwadratowego z częstości prądu.

5. NAGRZEWANIE DIELEKTRYCZNE

Materiały będące słabymi izolatorami elektrycznymi (ale wykazującymi stratność) nagrzewają się w polu elektrycznym. W przypadku kondensatora wykonanego z doskonałego dielektryka istnieje zależność między kwadratem napięcia i kwadratem natężenia prądu. Inaczej ma się sprawa w przypadku kondensatora rzeczywistego, który cechuje się stratnościami określonymi oporem włączonym równolegle w pojemność kondensatora. W takim kondensatorze zależność napięcia i prądu nie zachodzi według ich wartości kwadratowych, ale wielkości te są przesunięte w fazie o wartość $(\frac{\pi}{2} - \delta)$, przy $\tan \delta = \frac{1}{RC\omega}$, gdzie δ oznacza kąt stratności. Impedancja równoważna $Z = \frac{R}{1 + jRC\omega}$, a $u = \frac{R}{1 + jRC\omega}$ i $i = -j \frac{1}{C\omega(1 - j \tan \delta)}$.

Pojemność zależna od odległości d płyt i powierzchni S oraz od rodzaju kondensatora wynosi $C = \frac{\epsilon \cdot \delta}{d}$, co daje $u = \frac{-j i \cdot d}{\omega \epsilon S(1 - j \tan \delta)}$.

Wartość $\epsilon(1 - j \tan \delta)$, można wiązać ze stałą dielektryczną zespoloną ϵ' i w przypadku, gdy $\delta < 1$

$$\epsilon' = \epsilon(1 - j \tan \delta) = \epsilon(\cos \delta - j \sin \delta) = \epsilon e^{-j\delta} = \epsilon_1 - j\epsilon_2,$$

gdzie: ϵ_1 – jest przenikalnością elektryczną ośrodka (stała dielektryczna ośrodka),

ϵ_2 – jest wielkością urojoną charakteryzującą stratności dielektryczne.

Wydolność (moc) złożona P w kondensatorze o powierzchni S i grubości d przy napięciu U i prądzie I można określić z wyrażenia

$$P = U \cdot I^*,$$

gdzie: I^* – oznacza zespoloną wartość prądu I i wynosi

$$I^* = \omega SE \epsilon e^{-j(\frac{\pi}{2} - \delta)},$$

stąd

$$P = U \cdot I^* = \omega SE^2 d \epsilon e^{-j(\frac{\pi}{2} - \delta)}.$$

Moc czynna P_a w kondensatorze jest równa wartości rzeczywistej w mocy złożonej, czyli

$$P_a = \omega SE^2 d \epsilon \cos(\frac{\pi}{2} - \delta) = \omega SE^2 d \epsilon \sin \delta.$$

Ostatnie wyrażenie może być uproszczone do postaci

$$P_a = K f \epsilon^2 V \epsilon \operatorname{tg} \delta,$$

gdyż: $\sin \delta = \operatorname{tg} \delta$, gdy δ jest małe,

E – pole elektryczne,

V – objętość dielektryka,

K – współczynnik,

$\epsilon \operatorname{tg} \delta$ – współczynnik stratności,

f – częstość prądu.

To ostatnie wyrażenie wskazuje na to, że energia rozproszona w dielektryku jest proporcjonalna do kwadratu natężenia pola E . Współczynnik stratności $\epsilon \operatorname{tg} \delta$ zależy od częstości, gdyż rozmaite ładunki elektryczne podlegają wpływom pól e-m o swoistych długościach fal.

Ogólnie mówiąc, oddziaływanie pól e-m z materią wynika z ich oddziaływania z cząstkami naładowanymi w materiale, tj.:

a) z elektronami warstw wewnętrznych silnie związanymi z jądrami atomowymi;

b) z elektronami warstw zewnętrznych, elektronami swobodnymi, jonami związanymi z innymi jonami, jonami wolnymi, dipolami indukowanymi przez pola, cząstkami wielobiegunowymi.

W przedziale wielkich częstości pola e-m działają na poziomie elektromagnetycznym poprzez mniej lub bardziej wyraźne zależności rezonansowe. W przedziale małych częstości działanie pól e-m obejmuje zjawiska relaksacyjne zależne od tarcia, a przenikalność cechuje nieliniowość w funkcji często-

ści. Symbol ϵ oznacza absolutną wartość przenikalności elektrycznej. Jednakże przenikalność materiału jest wielkością złożoną i ϵ można wyrazić równanie

$$\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2,$$

co wskazuje na zmianę fazową pomiędzy polem E i indukcją D zależną od orientacji dipoli pod wpływem pola e-m. Zmiany (ϵ_1) i (ϵ_2) w funkcji częstości charakteryzują dany materiał i jego stan zależny od częstości pola e-m.

W dalszym ciągu niniejszego sprawozdania omówiona zostanie łącznie charakterystyka fizyczna jonów, ładunków i elektryczności statycznej, niektóre problemy stałego pola elektrycznego oraz problematyka stałego pola magnetycznego z jednoczesnym przedstawieniem działania biologicznego i higienicznych aspektów tych czynników fizycznych. Takie ujęcie pozwoli na ukazanie w jednolitym ujęciu poszczególnych zagadnień, przez co będzie można uniknąć rozmaitych niejasności i powtórzeń, gdyby te zagadnienia były poroizdzielane na zagadnienia fizyczne, zagadnienia działania biologicznego i zagadnienia oceny higienicznej.

6. JONY (j^{+-}), ELEKTRYCZNOŚĆ ATMOSFERYCZNA (E_{at}), STATYCZNA (E_s), POLE ELEKTRYCZNE PRĄDU STAŁEGO (E_d-c)

Elektryczność atmosfery odkryli niezależnie Franklin i Alibard w 1752 r. i od tego czasu datują się badania fizyczne jonów zawartych w atmosferze i badania nad ich działaniem biologicznym [wg Kellogg III, 1984]. Przyczyną powstawania jonów atmosferycznych są rozpady radioaktywne (radonu i toru), promieniowanie kosmiczne, promieniowanie UV, siły działające przy tarcu piasku i przy przelewaniu wody, linie wysokiego napięcia prądu stałego (DC), silne oddziaływania termiczne. Jonami w odniesieniu do powietrza są zjonizowane cząstki gazów i aerozoli, przy czym jonizacja takich cząstek powstaje pod wpływem czynników i sił wymienionych powyżej. Przypuszcza się, że jony atmosferyczne tworzą się z nadtlenu, np. O_2^- , CO_3^- , i z kompleksów molekularnych wody, np. $H^+(H_2O)_n$, $(H_3O)^+$, $(H_2O)_n$, $O + (H_2O)_n$, $OH^-(H_2O)_n$, $H_2O^-(H_2O)_n$, $O_2^-(H_2O)_n$, w których n wynosi 4-8. Ważne znaczenie biologiczne mają jony utworzone z cząstek zawierających tlen. O jakości powietrza świadczy stężenie jonów O_2^- , ale do oceny jakości powietrza stosowany jest współczynnik biegunowości q wyrażający stosunek sumy dużych i małych jonów dodatnich do sumy dużych i małych jonów ujemnych. W czystym powietrzu naturalnym współczynnik $q = 1$, natomiast w powietrzu zanieczyszczonym może on być istotnie większy lub mniejszy.

Jony dzieli się również, w zależności od ich wielkości i ruchliwości, na: a) jony małe i bardzo ruchliwe; b) jony średnie, powolniejsze; c) jony duże, bardzo powolne, przyczepione do cząstek pyłu. Jony małe, najbardziej czynne biologicznie i obdarzone ładunkiem ujemnym, są najruchliwsze ze wszystkich jonów atmosferycznych. W normalnym, czystym powietrzu atmosferycznym znajduje się

średnio 500 jonów ujemnych i 600 jonów dodatnich w 1 cm^3 . Bardzo ważnym spostrzeżeniem jest to, że w powietrzu pomieszczeń zamkniętych, w których przebywają ludzie, szybko zmniejsza się liczba małych jonów, ale i szybko wraca do normy w wyniku wietrzenia [Tyczka, 1976; Sałasiński, 1973; Hedge i Eleftherakis, 1982]. Tabela 4 zawiera klasyfikację jonów powietrza, a tabela 5 podaje

T a b e l a 4

Przykłady składu chemicznego niektórych małych jonów w powietrzu
[wg Kellogg III, 1984]

Wyszczególnienie				
Jony dodatnie:	$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{NH}_4^+ \text{NH}_3(\text{H}_2\text{O})_n$
Jony ujemne:	$\text{CO}_4^-(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{CO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$
	$\text{O}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{SO}_4^-(\text{H}_2\text{O})_n$	$\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$	
$n = 2 \text{ do } 8$				

T a b e l a 5

Wymiary i prędkość poruszania się jonów powietrza
[wg Kellogg III, 1984]

Rodzaj jonu	Średnica μm	Ruchliwość cm^2/Vs
Małe	.001 – .003	1
Średnie	.003 – .03	.05
Duże	.03 – .75	.005 – .00002

ruchliwość rozmaitych jonów. Stężenie jonów w powietrzu zmienia się także w zależności od warunków pogodowych i od wysokości nad powierzchnią ziemi. Na przykład w obserwatorium górskim w Kalifornii na wysokości 4342 m stwierdzono około $2,5 \times 10^3$ jonów (+ lub -) w cm^3 , a na poziomie morza w tej samej okolicy było 500-600 jonów w cm^3 [wg Kellogg III, 1984]. W licznych badaniach wykazano bakteriobójcze działanie jonów ujemnych. Stosując wyładowania koronowe jako źródło jonów ujemnych $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$, stwierdzono po 5 godzinach całkowite zabicie bakterii *Staphylococcus albus*, przy czym wykazano całkowite zahamowanie aktywności dysmutazy nadtlenkowej (SOD – superoxide dismutase), tj. enzymu katalizującego reakcję $\text{O}_2^- + \text{O}_2^- + 2\text{H}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, natomiast dodany do hodowli uniemożliwiający ciepłem enzym SOD nie zabijał bakterii. Małe jony dodatnie i ujemne pobudzają wzrost rozmaitych roślin i rozwój jedwabników, natomiast jony ujemne stosowane przez 3 miesiące powodowały u rosnących szczurów zwiększenie cię-

zaru okolic czuciowych i okolicy potylicznej kory mózgowia, w których wykazano również obniżenie stężenia serotoniny (5-HT) i cyklicznego AMP (cAMP). Badania działania jonów na ludzi wiązały się głównie z ich zastosowaniem leczniczym w stanach astmatycznych i oparzeniach, przy czym uzyskano pod wpływem jonów ujemnych poprawę w stanach astmatycznych i złagodzenie dolegliwości bólowych w oparzeniach. Nadto w innych badaniach stwierdzono korzystny wpływ jonów ujemnych na wydajność pracy umysłowej i poprawę ogólnego samopoczucia.

W dokładnie kontrolowanych warunkach badawczych okazało się, że pod wpływem jonów dodatnich czas reakcji wydłużał się tylko u osób z mało chwiejnym układem współczulnym (ALS — autonomic lability scores). Jeśli zaś wyniki rozpatrywano łącznie u osób z mało chwiejnym i bardzo chwiejnym układem współczulnym, to nie stwierdzono różnic czasu reakcji w stosunku do czasu reakcji u osób kontrolnych. Owe wyniki badawcze wskazują na to, jak trzeba być ostrożnym i dokładnym w planowaniu badań nad biologicznym działaniem jonów powietrza.

Teoretyczne rozważania nad mechanizmem działania jonów powietrza wskazują na odrębność wpływów małych i dużych jonów, tak ujemnych, jak i dodatnich. Jony powodują oczyszczanie powietrza z pyłów, dymów i innych cząstek, jak bakterie i rozmaite elementy patogenne. Z drugiej strony jony mogą pobudzać pewne receptory swoiste, ale nie wykazano dotychczas takich receptorów. Ze względu na obecność ładunku elektrycznego jony mogą działać na drodze pobudzeń elektrostatycznych. Wymienione koncepcje działania jonów powietrza nie są na tyle dostatecznie potwierdzone, aby któraś z nich zyskała ogólną akceptację.

U szczurów poddawanych w okresie do 66 cykli działaniu dodatnich lub ujemnych jonów w powietrzu o stężeniach $5 \times 10^5/\text{cm}^3$ albo działaniu stałego pola elektrycznego (DC) o natężeniu 3 kV/m nie stwierdzono istotnych zmian stężenia noradrenaliny (NA) i dopaminy (DA) w podwzgórzu, pniu mózgu, hipokampie i korze czołowej mózgowia [Charry i Bailey, 1985]. Zastosowanie jonów o takich samych stężeniach i pola DC o takim samym lub wyższym natężeniu (12 kV/m) nie spowodowało zmian aktywności ruchowej i zachowań hodowlanych u szczurów, co świadczyło o tym, że szczury nie wykrywają tego typu zmian w środowisku [Bailey i Charry, 1986].

Przeprowadzone badania nad reakcjami stresowymi i pobudzeniowymi oraz rozwiązywaniem złożonych zadań (rozróżnianie 24 kolorów i podanie słowne koloru tuszu spośród 24 słownych określeń kolorów) wśród 28 sekretarek szpitalnych (które nigdy przedtem nie przechodziły podobnych badań) poddanych działaniu małych ujemnych jonów, otrzymywanych z jonizatora o wydajności 15×10^9 małych ujemnych jonów na sekundę, nie wykazały korzystnego działania tych jonów na jakość i sprawność wykonania zastosowanych testów [Hedge i Collis, 1987].

Dotychczasowe wyniki badań doświadczalnych na zwierzętach i u ludzi nie dały podstaw do jednolitego poglądu na działanie biologiczne jonów powietrza. Z higienicznego punktu widzenia jest to jednakże dosyć ważna problematyka, gdyż dotyczy tak środowiska pracy, jak i środowiska komunalnego. W środowisku komunalnym dodatkowym "pochłaniaczem" jonów ujemnych są odbiorniki telewizyj-

ne,] do których w kierunku lampy kineskopowej płynie strumień jonów ujemnych z otaczającego powietrza [Korniewicz, 1986]. Nie wiadomo, jaki to ma wpływ na samopoczucie osób korzystających z programów telewizyjnych, zwłaszcza systematycznie, przez kilka lub kilkanaście godzin na dobę.

W wielu zakładach produkcyjnych i biurach czynione są próby zastosowania jonizatorów powietrza w celu poprawy jego walorów zdrowotnych. Nie szły i nie idą za tym w parze odpowiednie badania i obserwacje lekarskie, które dostarczałyby danych do rzeczywistej oceny wpływu tego typu jonizacji powietrza na zdrowie pracowników.

W wyniku wieloletnich badań nad biologicznym działaniem jonów powietrza wprowadzono w ZSRR przepisy sanitarne w sprawie minimalnych, optymalnych i dopuszczalnych zawartości jonów lekkich w powietrzu o ruchliwości powyżej 1 cm/s/V/cm (Wytyczne sanitarne nr 21-52-50 z 1980 r.). Jednocześnie udostępniono dwa typy liczników do pomiaru stężenia tych jonów (typ SAI-TG4 i ASI-1). W tabeli 6 podano zalecenia wymienionych przepisów w sprawie stężeń jonów w środowisku pracy.

T a b e l a 6

Wytyczne w sprawie zawartości jonów lekkich (małych)
w powietrzu środowiska pracy
(Wytyczne sanitarne nr 21-52-50, 1980, ZSRR)
[wg: Korniewicz, 1986]

Poziom jonizacji	Liczba jonów małych w 1 cm ³		Wskaźnik P
	n ⁺	n ⁻	
Minimalny, niezbędny	400	800	-0,2
Optymalny	1500-3000	3000-5000	-0,5-0
Maksymalny, dopuszczalny	50 000	50 000	-0,05-+0,05

n⁺ - liczba jonów dodatnich

n⁻ - liczba jonów ujemnych,

P - wskaźnik biegunowości wyznaczany ze wzoru $P = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-}$

Działanie jonów powietrza rozpatrywane jest również w aspekcie zastosowań leczniczych. W tym aspekcie przyjmuje się, że działanie biologiczne małych jonów dodatnich i ujemnych jest przeciwstawne i dotyczy następujących elementów i funkcji [Krueger, 1962; Palti i współaut., 1966]:

Wpływ na struktury i ich funkcje	Małe jony	
	dodatnie	ujemne
Aktywność nabłonka rzęskowego	hamowanie	wzmaganie
Tyłna ściana tchawicy	skurcz	rozkurcz
Naczynia krwionośne	skurcz	rozkurcz
Częstość oddychania	zwiększają	zwalniają
Podatność na uraz	zwiększają	obniżają

Badania przeprowadzone u dzieci zdrowych i u dzieci cierpiących na oskrzelowe stany astmatyczne dały następujące wyniki:

A. Po zastosowaniu jonów ujemnych: a) skrócenie czasu trwania ataków astmatycznych; b) zwolnienie przyspieszonego oddychania w przypadku zapalenia oskrzeli z odczynem skurczowym i zapalenia odoskrzelowego płuc; c) przerwanie ataku astmatycznego skurczowego wywołanego jonami dodatnimi; d) korzystne działanie jonów ujemnych w stanach astmatycznych występowało w pełni po 8 godzinach od rozpoczęcia jonizacji; e) po przerwaniu stosowania jonów ujemnych obserwowano nawrót stanu skurczowego umiarkowanego stopnia i przyspieszenie oddychania w ciężkich stanach.

B. Po zastosowaniu jonów dodatnich: a) występowanie ataków skurczu oskrzeli u zdrowych dzieci; b) przeciwdziałanie korzystnym wpływom jonów ujemnych u dzieci cierpiących na stany astmatyczne; c) przyspieszenie oddychania; d) działanie jonów dodatnich powodujące napady astmatyczne ujawniało się w pełni po około 10 godzinach od rozpoczęcia jonizacji.

Organizm dziecka jest bardzo wrażliwy na rozmaite bodźce środowiskowe i stąd łatwiej wykazać u niego korzystne i niekorzystne działanie jonów atmosferycznych [Palti i współaut., 1966]. Badania przeprowadzone u osób dorosłych nad wpływem ujemnych jonów na czynniki fal alfa mózgowia (EEG) i na czas reakcji prostych oraz badania ankietowe dotyczące wrażliwości na zmiany pogody, częstość występowania migreny i zmian sprawności w wykonywaniu czynności prostych nie wykazały istotnych zmian, które można by wiązać z działaniem jonów ujemnych [Hedge i Eleftherakis, 1982].

Elektryczność statyczna (E-s) jest wynikiem obecności elementarnych ładunków elektrycznych, natomiast całkowity ładunek elektrostatyczny oznacza stan nagromadzenia na powierzchni ciała izolowanego, w tym także na powierzchni ciała człowieka, elementarnych ładunków elektrycznych. Jednocześnie na powierzchni innego obiektu znajdującego się w pewnej odległości (np. podłoga, ściany, przedmioty) gromadzi się ładunek o znaku przeciwnym. Ładunki elektryczne powstają w wyniku: 1) działania mechanicznego, np. tarcia, rozdzielania, rozdrabniania; 2) zmiany stanu skupienia; 3) działań termicznych; 4) procesów elektrochemicznych; 5) jonizacji powietrza; 6) napięć kontaktowych; 7) indukcji elektrycznej. Na wielkość ładunku wpływają: konduktywność elektryczna, permitancja, liczba i zagęszczenie punktów styku, szybkość zachodzących procesów, zmiany ekspansji i kompresji, temperatura powierzchni obiektu [Haase, 1971; Korniewicz i Koperski, 1979; Strojny, 1979]. Na powierzchni ciała człowieka może nagromadzić się energia elektrostatyczna o następujących wartościach: energia $6,46 \pm 3,25$ mJ; pojemność $65,9 \pm 12,1$ pF; napięcie $13\,800 \pm 4440$ V [Marble i współaut., 1977].

Z uwagi na ilość i rozmieszczenie ładunków rozróżnia się:

- a) ładunki punktowe (q) — jednostką ładunku jest kulomb (C), $1\text{ C} = \text{A} \cdot \text{s}$;
- b) ładunki liniowe — jednostką gęstości liniowej ładunku jest 1 C/m ;
- c) ładunki powierzchniowe — jednostką gęstości powierzchniowej ładunku (ρ) jest C/m^2 ;

d) ładunki przestrzenne – jednostką gęstości objętościowej (przestrzennej) ładunku jest 1 C/m^3 .

Pole elektrostatyczne (e-s) cechuje się określonym potencjałem mierzonym w V oraz określonym natężeniem E mierzonym w V/m. Natężenie pola E wynikające z obecności ładunku jest proporcjonalne do gęstości powierzchniowej $\bar{\rho}$ ładunku. W próżni oraz w przybliżeniu w powietrzu określa to zależność

$$\bar{\rho} = \epsilon_0 E,$$

gdzie: $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ C/V} \cdot \text{m}$ – oznacza przenikalność elektryczną próżni.

Podobna zależność odnosi się do indukcji elektrycznej D , czyli do przesunięcia elektrycznego, tj.

$$D = \epsilon_0 E.$$

W odniesieniu do materii obowiązuje zależność

$$\bar{\rho} = \epsilon_0 \epsilon_r E,$$

gdzie: ϵ_r – oznacza przenikalność elektryczną względną (czyli stałą dielektryczną) danego materiału.

W izolatorach i w materiałach dielektrycznych poddanych działaniu silnego pola elektrycznego następuje przewodzenie prądu przy określonej wartości progowej pola, przy czym następuje wówczas zjawisko nagłego wyładowania, tj. przebicia. Wartość progowa pola do spowodowania przebicia zależy od geometrycznego kształtu oraz od typu i cech materiału. W powietrzu przebicie następuje przy natężeniu pola E rzędu $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Przyjmując $\epsilon_r \approx 1$, można wykazać, że maksymalna gęstość ładunku na danym materiale w powietrzu wynosi

$$\bar{\rho}_{\text{maks.}} = 26,6 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2.$$

Oznacza to, że przy tej gęstości powierzchniowej ładunku nie następuje przebicie w normalnych warunkach atmosferycznych. Gęstość powierzchniowa ładunku może być zwiększona bez ryzyka przebicia, jeśli ładunki gromadzą się na materiale izolującym połączonym z przedmiotem uziemionym. Na wielkość zgromadzonego ładunku wpływa także pojemność elektryczna danego materiału. Pojemność C wyrażona w faradach (F) dla ciała człowieka zajmującego pozycję stojącą wynosi

$$C_{\text{człowiek}} = 100 \text{ pF}.$$

Znając pojemność elektryczną obiektu i nagromadzony na nim potencjał, można obliczyć energię elektryczną w dżulach (J)

$$E = 10^{-3} \frac{C \cdot V^2}{2},$$

gdzie: E — energia (mikrodżule) = 10^{-6} J,
 C — pojemność (pikofarady) = 10^{-12} F,
 V — potencjał (kV) = 10^3 V.

Oprócz zasadniczych, wymienionych powyżej przyczyn powstawania ładunków elektrostatycznych, na ich wielkość wpływają:

- a) przewodność elektryczna materiałów;
- b) przenikalność elektryczna, czyli stała dielektryczna materiałów;
- c) liczba i zagęszczenie punktów styku różnych materiałów;
- d) szybkość zachodzenia procesów mechanicznych i chemicznych;
- e) fizyczne zmiany materiałów, jak rozszerzalność i kurczliwość;
- f) temperatura powierzchni danych materiałów.

Wykazano istotne zależności pomiędzy przenikalnością elektryczną materiałów i ich zdolnością do gromadzenia ładunków (reguły Coehna):

I. W czasie powstawania ładunków na skutek oddziaływania na siebie dwóch materiałów, materiał o większej przenikalności elektrycznej gromadzi ładunek dodatni, natomiast materiał o mniejszej przenikalności gromadzi ładunek ujemny.

II. Ilość nagromadzonych ładunków zależy od różnicy przenikalności elektrycznej danych materiałów.

Są pewne zjawiska niezgodne z tymi regułami. Na przykład według tych reguł nie powinien tworzyć się ładunek w wyniku oddziaływania podobnych lub takich samych materiałów. Wynikałoby z tego, że folia polietylenowa ułożona w warstwach nie powinna tworzyć i gromadzić ładunków elektrostatycznych. Tymczasem stykające się i ocierające warstwy folii polietylenowej wytwarzają i nagromadzają duży ładunek elektrostatyczny. Okazuje się, że w powstawaniu ładunków istotne znaczenie ma liczba punktów styku pomiędzy warstwami przylegającymi do siebie. Warstwy folii polietylenowej przylegają właśnie ściśle do siebie, czyli mają bardzo dużo punktów styku. Należy dodać, że w procesie produkcji folii polietylenowej można wymienić kilka przyczyn powstania ładunków elektrostatycznych, tj. proces zestalenia i wysoka temperatura, ocieranie folii o wałki napędowe, punktowanie folii wyładowaniami prądu w.cz., ocieranie się i stykanie warstwy folii podczas jej rolowania.

Znak powstającego ładunku podczas stykania się dielektryka z metalem zależy w dużym stopniu od rodzaju dielektryka. Z tego punktu widzenia dielektryki uporządkowano w tzw. szeregi elektrostatyczne, tj. uporządkowanie według znaku ładunku powstającego podczas elektryzacji mechanicznej. Poniższe zestawienie jest przykładem takiego szeregu elektrostatycznego materiałów:

ładują się dodatnio (+)

szkło	wełna	azbest
włosa ludzkie	perlon III	szkło
nylon	jedwab naturalny	mika
wełna	papier	wełna
jedwab naturalny	stal	futro

ładują się dodatnio (+)

bawełna	szkło	ołów
papier	nylon	jedwab
stal	bawełna	aluminium
ebonit	skóra	papier
guma	orlon	bawełna
dakron	polichlorek winylu	drewno
orlon	ebonit	lak
polietylen	guma	ebonit
		miedź, mosiądz, srebro
		siarka
		platyna, rtęć
		kauczuk

ładują się ujemnie (-)

Jak widać, materiały uszeregowane według różnych autorów różnią się pozycją w szeregu. Szereg taki oznacza, że każdy materiał z tego szeregu elektryzuje się dodatnio podczas pocierania go innym materiałem zajmującym pozycję w dalszej części szeregu, ale z kolei ten materiał elektryzuje się ujemnie. Na uwagę zasługuje stosunkowo niska pozycja polietylenu i polichlorku winylu w podanym szeregu. Obydwa te tworzywa cechują się stosunkowo małą wartością stałej dielektrycznej, o czym świadczy poniższe zestawienie.

Rodzaj materiału	Odporność skrośna Om cm	Stała dielektryczna		
		ϵ_{50}	ϵ_k	ϵ_M
Polietylen				
a) o dużej gęstości	$10^{15} - 10^{18}$	2,25 2,35	2,25 2,35	2,25 2,38
b) o średniej gęstości	$10^{14} - 10^{18}$	2,20 2,40	2,20 2,40	2,20 2,40
c) o małej gęstości	$10^{13} - 10^{19}$	2,28 2,32	2,28 2,32	2,28 2,32
Polichlorek winylu (PCW)				
a) twardy (winidur)	$10^{14} - 10^{16}$	3,20 3,60	3,00 3,30	2,80 3,10
b) z plastyfikatorem (40%)	$10^{12} - 10^{14}$	5,50 8,50	3,00 8,00	2,80 4,50
c) zmiękczony z napełniaczem	$10^{11} - 10^{14}$	5,00 6,00	4,00 5,00	3,50 4,50

ϵ_{50} - stała dielektryczna dla pola 50-60 Hz,

ϵ_k - " " " " 800-1000 Hz,

ϵ_M - " " " " 1 MHz.

Z powyższego zestawienia widać, że stała dielektryczna wykazuje niewielkie różnice dla polietylenu zależnie od jego stopnia twardości, natomiast widać istotną zmianę wartości stałej dielektrycznej dla polichlorku winylu po dodaniu czynników zmiękczających.

7. METODYKA POMIARÓW WIELKOŚCI FIZYCZNYCH ELEKTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ

Pomiary elektryczność statycznej mają na celu określenie stanu naelektryzowania lub podatności na elektryzowanie się materiałów, urządzeń i osób stakających się z nimi. Stopień naelektryzowania jest określony przez następujące wielkości:

- 1) wypadkowy ładunek elektryczny,
- 2) gęstość powierzchniową ładunku,
- 3) potencjał powierzchni danego obiektu względem ziemi,
- 4) napięcie między obiektem i ziemią,
- 5) natężenie pola elektrycznego w otoczeniu obiektu.

Na stanowiskach pracy można wykonać w praktyce następujące pomiary:

- a) wielkość potencjału elektrycznego V danego materiału lub urządzenia względem ziemi (wynik w V);
- b) natężenie pola elektrycznego E w otoczeniu obiektu (wynik w V/m);
- c) wielkość ładunku Q i jego biegunowość (+ lub -) (wynik w C).

Pomiaru ładunku Q i potencjału V dokonuje się woltomierzami elektrostатыcznymi i elektrometrami. Poza tym wielkości te można obliczyć z pomiarów natężenia pola jednorodnego. Do wyznaczenia biegunowości ładunku stosuje się: 1) w naładowanych przewodnikach: a) mierniki natężenia pola – biegunowość odcenia się z kierunku wychylenia wskazówki miernika, b) według kierunku wpływu prądu, c) woltomierze prądu stałego, d) woltomierze elektrostатыczne lub elektrometry wskazujące kierunek przepływu prądu; 2) w naładowanych dielektrykach: a) według wychylenia wskazówki miernika natężenia prądu, b) z zastosowaniem proszku do oceny miejscowego rozłożenia ładunku. Pomiar natężenia pola elektrycznego E w otoczeniu obiektów naładowanych wykonuje się miernikami natężenia pola elektrostатыcznego, które jednocześnie mogą służyć do wyznaczenia biegunowości ładunku. Do pomiarów stopnia naelektryzowania osób i oporności pomiędzy osobą i ziemią niezbędne są dodatkowe urządzenia, na przykład specjalna komora Faradaya, układy wzmacniające i rejestrujące. Oporność mierzy się pomiędzy elektrodą trzymaną w ręce i płytą przewodzącą, na której stoi dana osoba, ale droga oporności się znajduje pomiędzy ręką i butami. Dla ochrony przed elektryzowaniem ciała człowieka jego oporność powinna być możliwie najmniejsza. Pomiary stopnia naelektryzowania osób i ich oporności możliwe są w zasadzie w warunkach laboratoryjnych.

W celu dokładnego rozpoznania przyczyn elektryzowania się materiałów i urządzeń oraz eliminowania tego zjawiska niezbędne są bardzo specjalistyczne pomiary, tj. pojemności i przewodności, przenikalności względnej, czyli stałej

dielektrycznej, oporności względem ziemi i skuteczności uziemienia, prądu ładowania i rozładowania oraz podatności ładowania i rozładowania podłogi, a także pomiar właściwości izolacyjnych materiałów ochronnych.

Oczywista, że każdy przyrząd wprowadzony w obszar oddziaływania elektryczności statycznej powoduje zmniejszenie sił działających w tym obszarze. Musi to być brane pod uwagę tak przy konstrukcji przyrządów pomiarowych (miniaturyzacja zwłaszcza czujnika), jak i przy ich skalowaniu. Jedną z najważniejszych reguł odnoszących się do takich przyrządów jest ich wewnętrzne zasilanie (baterijne lub akumulatorowe) oraz użycie elementów pobierających możliwie najmniejsze ilości prądu. Duży postęp techniczny w eliminowaniu zakłócenia pomiarów uzyskano przez zastosowanie światłowodów zamiast zwykłych lub współosiowych przewodów do połączenia czujnika (sondy) z aparatem wskazującym mierzone wielkości. Zewnętrzne pole elektryczne praktycznie nie wpływa na fale przewodzone w światłowodach, przez co wyeliminowane zostało jedno z najważniejszych zakłóceń, jakie występowały w przypadku stosowania zwykłych lub współosiowych.

Do pomiarów potencjału elektrycznego V i natężenia pola elektrycznego E stosuje się najczęściej pojedynczy miernik wyposażony w woltomierz elektrostatyczny i kondensator zwykły lub wirujący. Do pomiarów napięć i ładunków elektrostatycznych wykorzystuje się specjalne elektrometry oparte na zasadzie elektroskopu lub elektrometru listkowego.

Praktyczne zastosowanie do pomiarów natężenia pola elektrycznego E znajdują także przyrządy działające na zasadzie zmiany prądu jonizacji powietrza. Sonda takiego miernika zawiera substancję promieniotwórczą, która wywołuje jonizację powietrza, a z kolei prąd tej jonizacji ulega zmianie w polu elektrycznym, co stanowi podstawę pomiaru.

W krajowych ośrodkach badawczych opracowano kilka przyrządów do pomiaru wielkości fizycznych elektryczności statycznej. W Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego wykonano miernik natężenia pola elektrycznego typ MNP-75, który można stosować do pomiarów w strefach zagrożonych wybuchem. Miernik działa na zasadzie zmiany pojemności kondensatora utworzonego przez nieruchomą powierzchnię badaną i ruchomą elektrodę głowicy pomiarowej. W tym samym Instytucie wykonano też miernik gęstości powierzchniowej ładunku (typ EMGP-11), przy czym oparty jest on na zasadzie indukcji elektrostatycznej i mierzy natężenie.

Poniżej podane są przykłady stwierdzonych potencjałów elektrycznych na materiałach i obiektach podczas typowych prac:

- | | |
|--|--------------|
| - ruch pasów transmisyjnych z prędkością 5 – 10 m/s | 30 – 50 kV |
| - przewijanie beli papieru z prędkością 10 m/s | do 150 kV |
| - praca w pozycji siedzącej na krześle metalowym lakierowanym | 200 kV |
| - praca w pozycji siedzącej na krześle metalowym po odizolowaniu nóg krzesła | 150 V – 7 kV |
| - chodzenie w obuwii na spodach gumowych (droga) | 400 V – 1 kV |
| - chodzenie w obuwii na spodach gumowych po dywanie wełnianym | do 20 kV |
| - chodzenie w obuwii na spodach skórzanych | 300 – 400 kV |

- ruch samochodu po jezdni betonowej do 3 kV
- ruch transportera zbożowego z prędkością 4 m/s do 45 kV

Przeprowadzono również pomiary ładunku nagromadzonego na osobach w zależności od stosowanego ubioru. W 1963 r. pomiary wykonane w USA wykazały następujące średnie wartości ładunku dla 10 mężczyzn i 10 kobiet (pomiary wykonano po wejściu i po wyjściu ze specjalnej komory Faradaya, ale po uprzednim wykonaniu odpowiednich czynności ruchowych).

	ładunki w kulombach $\times 10^{-9}$					
	stanie		chód		bieg	
	po wejściu	po wyjściu	po wejściu	po wyjściu	po wejściu	po wyjściu
Mężczyźni	0,348	0,385	0,385	0,315	0,366	0,268
Kobiety	87,6	124,7	95,9	152,8	121,5	199,7

W zestawieniu tym zwraca uwagę ponad 300-krotnie większy ładunek zgromadzony na kobietach niż na mężczyznach. Nagromadzenie tak dużego ładunku było spowodowane noszeniem przez badane kobiety bielizny osobistej i niektórych części odzieży wierzchniej z tkanin sztucznych. Okazało się przy tym, że na wielkość gromadzonego ładunku w głównym stopniu wpływa jakość dolnej części ubioru.

8. DZIAŁANIE BIOLOGICZNE ELEKTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ

Elektryczność statyczna nagromadzona na człowieku lub na obiektach jego pracy wywiera działania biologiczne o niekorzystnych następstwach:

A. Działanie bezpośrednie:

a) wstrząsy elektryczne o różnej sile w wyniku nagłego rozładowania nagromadzonego ładunku;

b) wyładowania zapłonowe w przypadku obecności substancji łatwopalnych: *gł. brzoś* pomiędzy uziemionym człowiekiem i naładowanym przewodnikiem lub izolatorem,

2) pomiędzy naładowanym człowiekiem i uziemionym lub izolowanym przewodnikiem.

Wstrząsy elektryczne na skutek wyładowania ładunku elektrostatycznego mogą być przyczyną obrażeń bezpośrednich i pośrednich spowodowanych wypadkiem (na przykład wypuszczenie trzymany przedmiotów, dotknięcie przedmiotów w ruchu lub pod napięciem). Człowiek wykazuje następującą wrażliwość na wyładowania elektrostatyczne:

- wstrząs odczuwalny przy energii wyładowania 0,002 J
- wstrząs wyraźnie odczuwalny przy energii wyładowania 0,01 J
- ciężki wstrząs nerwowy przy energii wyładowania 0,25 J
- niebezpieczeństwo śmiertelnego porażenia przy energii 10,00 J

8. Działanie pośrednie ogólnoustrojowe:

opowiedz ustnie

a) ekranowanie dostępu naturalnych pól elektromagnetycznych do organizmu człowieka; takie funkcje organizmu, jak dobowy rytm temperatury ciała oraz odporność fizyczna i psychiczna, zależą w dużym stopniu od działania naturalnych pól elektromagnetycznych; zakłócenia dostępu tych pól do organizmu przez ekranujące działanie ładunku elektrostatycznego powoduje zaburzenia rytmów biologicznych i ogólne złe samopoczucie ludzi;

b) zakłócenia czynności bioelektrycznej mózgu i serca; w czasie pracy tych narządów następują procesy bioelektryczne rejestrowane w formie elektroencefalogramu (EEG) i elektrokardiogramu (EKG); obecność dużego ładunku elektrostatycznego na powierzchni ciała człowieka może na drodze indukcji powodować zakłócenia normalnych procesów bioelektrycznych;

c) inne zmiany ogólnoustrojowe:

1) odczucia subiektywne, na przykład "mrowienia" w różnych okolicach skóry, bóle głowy, drażliwość nerwowa,

2) zwiększona zachorowalność na choroby układu nerwowego, układu krążenia i układu oddechowego,

3) w badaniach okresowych przeprowadzonych w Oddziale Biofizyki Klinicznej Instytutu Medycznego w Rydze na 1500 pracownikach zatrudnionych w narażeniu na pola elektrostatyczne o różnych natężeniach dochodzących do 1500 kV/m oraz u pracowników nie narażonych na takie pola stwierdzono u pracowników pierwszej grupy większą częstość zaburzeń ze strony autonomicznego układu nerwowego w postaci: różnic temperatury dla symetrycznych okolic ciała, zmienionej oporności elektrycznej skóry, zmian czynności enzymu cholinesterazy we krwi oraz osłabienia odporności immunologicznej ustroju.

patrz

C. Występowanie zmian w stanie zdrowia pod wpływem narażenia na elektryczność statyczną potwierdzono w badaniach doświadczalnych na ludziach. Przeprowadzono takie badania w Instytucie Higieny Pracy w Leningradzie na ochotnikach mężczyzn w wieku 20-30 lat. W ciągu 10-14 dni przed doświadczeniem wykonano u nich badania kontrolne. Następnie mężczyzn poddawano przez 2 godz. dziennie przez kolejnych 30 dni w okresie 2 miesięcy działaniu pola elektrostatycznego o natężeniach 20, 30, 60 i 90 kV/m. Badania kontynuowano przez 10-15 dni po zakończeniu ekspozycji. W czasie badań oceniano: sprawność psychiczną, czynność ośrodkowego układu nerwowego, układu krążenia, morfologię krwi obwodowej, temperaturę ciała oraz wydolność mięśniową na podstawie wysiłku dozowanego na ergometrze rowerowym. W badaniach tych nie stwierdzono niekorzystnych zmian pod wpływem pola o natężeniach 20 i 30 kV/m. Pod wpływem pola o natężeniu 60 kV/m stwierdzono istotne obniżenie o 14-16 mmHg ciśnienia skurczowego krwi. Po wysiłku na ergometrze występowała skłonność do wzrostu ciśnienia skurczowego krwi i obniżenia ciśnienia rozkurczowego krwi; stwierdzono także obniżenie progu pobudliwości nerwowo-mięśniowej na drażnienie impulsami elektrycznymi oraz chwiejność czynnościową ośrodków podkorowych mózgu. Zmiany te były przejściowe i ustępowały szybko po ustaniu ekspozycji na pola elektrostatyczne. Pod wpływem pola e-s o natężeniu 90 kV/m stwierdzono następujące niekorzystne zmiany u badanych mężczyzn: wyraźne zaburzenia czynnościowe układu

sercowo-naczyniowego, zmiany we krwi obwodowej, obniżenie dokładności w wykonywaniu pracy i zwiększenie liczby popełnianych błędów. Takie zaś zmiany, jak obniżenie ciśnienia krwi, zwolnienie czynności serca, zmniejszenie liczby płytek krwi utrzymywały się przez 5-7 dni po zaprzestaniu działania pola e-s. Badania te były wykonane w celu uzyskania danych do ustalenia normatywu higienicznego w odniesieniu do pól elektrostatycznych.

2) Podczas nagłego rozładowania elektryczności statycznej może występować odczucie bólu w miejscu przeskoku ładunku. Wykonano badania doświadczalne mające na celu ustalenie progowego potencjału, przy którym podczas wyładowania odczuwany jest ból. Podczas rozładowania z naładowanego obiektu na człowieka progowe napięcie do spowodowania uczucia bólu wynosiło 1860 ± 450 V. Stwierdzono podobne napięcia progowe do wywołania objawów bólu u zwierząt doświadczalnych. Na podstawie tych badań zaproponowano, aby napięcie 1000 V elektryczności statycznej przyjąć jako wielkość wyjściową do ustalenia normatywu higienicznego w odniesieniu do dopuszczalnego potencjału elektryczności statycznej o bieguności dodatniej.

W badaniach doświadczalnych wykazano także znaczenie układu linii sił pola elektrostatycznego dla występowania zmian biologicznych. Bardziej niekorzystne działania stwierdzono w przypadku pionowego ich układu. Na podstawie tych badań przedstawiono projekt, aby normatyw higieniczny pola e-s zawierał się w granicach 15 – 200 V/cm (czyli 15 000 – 20 000 V/m).

Należy podkreślić, że w fachowym piśmiennictwie opisane są nieliczne wyniki badań lekarskich pracowników narażonych na pola elektrostatyczne. Co więcej, opublikowane dotychczas wyniki badań różnią się tak pod względem stwierdzonych zmian, jak i pod względem wyciągniętych wniosków. Z całą pewnością ustalono doświadczalnie, że natężenie pola elektrostatycznego rzędu 100 kV/m powoduje u człowieka zmiany termoregulacji w wyniku wzmożonego ukrwienia odpowiednich okolic ciała i wzmożonego pocenia.

Z drugiej strony należy podkreślić to, że szereg badań wskazuje na korzystne działanie pola elektrostatycznego na organizmy żywe, w tym i na człowieka, co nawet wykorzystuje się w fizykoterapii.

Na podstawie zestawienia wyników badań doświadczalnych i obserwacji lekarskich przedstawionych w piśmiennictwie radzieckim wykazano, że natężenia pól e-s rzędu 10 – 180 kV/m są zbliżone do natężenia pól e-s stwierdzanych na materiałach syntetycznych w warunkach ich produkcji i użytkowania. Zwrócono także uwagę na to, że najodpowiedniejszym parametrem do oceny biologicznego działania pól e-s jest natężenie tych pól w V/m. W wyniku przeglądu wyników dotychczasowych prac doświadczalnych i badań lekarskich nad oddziaływaniem elektryczności statycznej uznano, że nie stanowią one dostatecznie uzasadnionej podstawy do ustalenia dopuszczalnych natężeń pól elektrostatycznych. W piśmiennictwie radzieckim oraz w zaleceniach amerykańskich stwierdza się potrzebę dalszych badań i obserwacji lekarskich nad działaniem biologicznym e-s w celu uzyskania dostatecznej ilości danych do ustalenia normatywu higienicznego w odniesieniu do tego czynnika zagrożenia zawodowego na stanowiskach pracy i w życiu codziennym.

za mało badań, by być pod uwagę
te skutki

normatywy hig. nr 20 10296du na bezp. pracy.

9. DOPUSZCZALNE WIELKOŚCI ELEKTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ

W przedstawieniu tego problemu należy rozróżniać trzy aspekty:

1. Ograniczenie e-s przed wyładowaniami zagrażającymi zapłonem substancji łatwopalnych.

2. Ograniczenie e-s przed wyładowaniami powodującymi wstrząsy i odczucia bólowe u człowieka.

3. Ograniczenie e-s z punktu widzenia niekorzystnego działania ogólnoustrojowego u człowieka.

W odniesieniu do zagrożenia wybuchowego i zapłonowego e-s wielkości fizyczne (potencjał, energia) do spowodowania zapłonu poszczególnych substancji, jak i stężenia wybuchowe i zapłonowe tych substancji są dobrze rozpoznane. Problematyka ta jest głównie dziedziną bezpieczeństwa pracy. Ogólnie wiadomo, że jeśli koncentracja energii w danym miejscu osiągnie progową wielkość, to w przypadku mieszaniny wybuchowej może nastąpić zapłon. Decydujące znaczenie w spowodowaniu takiego zapłonu mają właściwości fizyczne źródła zapłonu, warunki miejscowe, rodzaj łatwopalnego materiału i stosunki mieszania się materiału z powietrzem. Napięcie e-s powodujące przy wyładowaniu progowe odczucie bólu wynosi 1860 ± 450 V. Ustalono poza tym odpowiednią gradację odczuwania przez człowieka wyładowań e-s:

- napięcie do 1,5 kV i energia iskry 0,002 J są słabo odczuwalne;
- napięcie do 3 kV i energia iskry 0,01 J są odczuwane w średnim stopniu;
- wyższe napięcia i energie iskry są odczuwane w dużym stopniu.

Można więc przyjąć, że wyładowania od napięć około 2000 V i energii iskry rzędu 0,001 J są wyraźnie odczuwane przez wszystkich ludzi i te wielkości można przyjąć jako dopuszczalne.

Niespodziewane wyładowania e-s na człowieka lub przez człowieka mogą być niebezpieczne z powodu reakcji wstrząsowych. Wstrząs i przestrasz mogą być powodem paniki, prowadząc do wypadków, a poza tym przepływ dużego ładunku nie jest obojętny dla zdrowia człowieka. Powszechnie się przyjmuje, że wstrząsy odczuwane są przez człowieka przy wyładowaniu elektrycznym z osoby do ziemi przy pojemności człowieka $C_{\text{człowiek}} = 200$ pF i odpowiadają energii około 0,4 mJ. Ciężki wstrząs powstaje przy energii 250 mJ, czemu odpowiada potencjał 50 kV. Bezpośrednie wyładowanie przez człowieka energii powyżej 10 J jest niebezpieczne dla życia. W przypadku energii 10 J występują następujące zależności pojemności C i potencjału V:

C	200 pF	2000 pF	0,2 μ F
V _{kV}	320	100	10

W folii tworzywa sztucznego mającego średnicę 50 cm, grubość 20 μ m i przenikalność elektryczną względną $\epsilon_r = 3$ w przypadku stykania się dwóch warstw może powstać pomiędzy przednią i tylną powierzchnią różnica potencjału rzędu 10 kV, a więc ładunek gromadzony w takich warunkach na folii stwarza zagrożenie dla człowieka.



Znane są dopuszczalne natężenia pola e-s w celu zapobiegania pożarom na skutek wyładowań podczas mieszania i przelewania płynów łatwopalnych. Jeszcze do niedawna nie były ustalone dopuszczalne natężenia pól e-s z myślą o ochronie zdrowia pracowników. W 1984 roku wydany został w ZSRR standard GOST 12.1.045-84, który odnosi się do pola e-s powstającego w otoczeniu urządzeń elektrycznych do wysokiego napięcia prądu stałego i do elektryzacji materiałów dielektrycznych. Standard ten ustanawia dopuszczalne wartości natężenia pola e-s na stanowiskach pracy oraz ogólne wymagania w sprawie badań kontrolnych i stosowania środków ochronnych. Natomiast standard nie odnosi się do pól e-s zagrażających pożarem podczas procesów mieszania. Dopuszczalne natężenia pól e-s ustanowiono w zależności od czasu narażenia pracowników na stanowiskach pracy, tj.

60 kV/m przy narażeniu w ciągu 1 godziny,

< 20 kV/m – czas przebywania nie podlega ograniczeniu.

W przedziale 20 – 60 kV/m dopuszczalny czas narażenia bez stosowania środków ochronnych wyznacza się z wyrażenia

$$t_{\text{dop.}} = \left(\frac{E_{\text{dop.}}}{E_{\text{fakt.}}} \right)^2,$$

gdzie: $t_{\text{dop.}}$ – czas dopuszczalny w godzinach,

$E_{\text{dop.}}$ – dopuszczalne natężenie pola e-s dla 1 godziny,

$E_{\text{fakt.}}$ – natężenie pola e-s zmierzone.

Nie podano komentarza do tego standardu, stąd nie wiadomo, jaka jest dokumentacja i jakimi się kierowano wskaźnikami w ustaleniu wymienionych dopuszczalnych natężeń pola e-s.

Powstawanie i nagromadzenie e-s na człowieku można ograniczyć następującymi sposobami:

1) Stosowaniem obuwia przewodzącego; takie buty mają wbudowany w podeszwie pasek z gumy przewodzącej, który przeprowadzony jest przez tylną część buta do jego wnętrza, i w ten sposób poprzez piętę noga kontaktuje się z paskiem przewodzącym i pośrednio z podłogą przewodzącą. W pomieszczeniach zagrożonych wybuchem oporność wpływowa podeszwy winna wynosić $10^5 - 10^8$ omów. Męskie trzewiki sandały i półbuty oraz damskie sandały prądotrwałe produkuje Spółdzielnia Pracy Przemysłu Skórzanego "Praca", 35-073 Rzeszów, pl. Wolności 8.

2) Stosowaniem odpowiedniej bielizny osobistej i odzieży oraz ubrania roboczego. Bielizna i odzież z tworzyw sztucznych stanowią potężne źródło powstawania elektryczności statycznej i ułatwiają gromadzenie się ładunków elektrycznych. Najlepsze właściwości antyelektrostatyczne wykazują tkaniny bawełniane i lniane. Stosowanie bielizny i odzieży z tkanin bawełnianych ogranicza nawet 1000-krotnie wielkość tworzonego i gromadzonego ładunku w stosunku do wielkości ładunku w przypadku bielizny i odzieży z włókien sztucznych.

W praktyce produkcyjnej bywają i takie sytuacje, że podane powyżej środki nie ograniczają w dostatecznym stopniu gromadzenia się ładunku elektrycznego na człowieku i zachodzi konieczność zastosowania typowego uziemienia, na przykład połączenia przegubu ręki przewodem z rurą wodociągową.

Przedstawiona powyżej problematyka ochrony zdrowia przed elektrycznością statyczną świadczy o potrzebie dalszych badań środowiskowych i lekarskich w celu uzyskania większej ilości miarodajnych wyników.

10. POLE MAGNETYCZNE STAŁE I WOLNOZMIENNE

Pola magnetyczne stałe i wolnozmiennie występują w otoczeniu naturalnych materiałów magnetycznych (magnesy), w liosferze i przestrzeni otaczającej Ziemię oraz towarzyszą przepływowi prądu stałego (DC — direct current) i prądu wolnozmiennego (AC — alternate current). Pola magnetyczne o stałych wielkościach w funkcji czasu są stacjonarne. Niestacjonarność pól magnetycznych wynika z takich zmiennych warunków przepływu prądu, jak zmiany natężenia, częstotliwości i modulacji. Natężenie H oznacza siłę magnetyzującą, natomiast gęstość strumienia B oznacza pole magnetyczne indukowane przez siłę magnetyzującą w określonym regionie danego materiału. Gęstość strumienia (indukcja) B wynikająca z siły magnetyzującej (natężenia) H zależy od przenikalności magnetycznej u , która jest wielkością charakterystyczną poszczególnych materiałów. Stąd istnieje zależność $B = uH$. Materiały ferromagnetyczne cechują się bardzo dużą przenikalnością magnetyczną względną, na przykład początkowa i maksymalna przenikalność magnetyczna wynosi dla żelaza czystego 250 — 7000, dla stopu niklu z żelazem wynosi 2700 — 20 000. Materiały paramagnetyczne i dimagnetyczne cechują się małą przenikalnością magnetyczną względną, na przykład przenikalność ta wynosi dla powietrza 1,000024, dla wody 0,999991, dla azotu 0,9999999927, dla platyny 1,00027.

Źródłami technicznymi stałych i wolnozmiennych pól magnetycznych są przewody linii wysokiego napięcia, przewody trakcji elektrycznej, stacje transformatorowe, maszyny i urządzenia zasilane prądem stałym i zmiennym, magnesy stałe, elektromagnesy, magnesnice, iskrowniki, elektrody metalowe i węglowe pieców łukowych na prąd stały i zmienny, elektrody urządzeń elektrolitycznych i instalacja elektryczna do ich zasilania, defektoskopy magnetyczne, obrabiarki do magnetycznego tłoczenia metali, komory pęcherzykowe, cyklotrony, reaktory termonuklearne, aparatura silnych pól magnetycznych do badań chemicznych, dźwigi magnetyczne, pociągi lewitacyjne (unoszone przez silne pole magnetyczne), spektrometry rezonansu jądrowego, w tym także do diagnostyki obrazowej w medycynie. W życiu codziennym źródłem pól magnetycznych jest sprzęt gospodarstwa domowego i powszechnego użytku zasilany prądem zmiennym (w bezpośredniej bliskości występuje słabe pole magnetyczne o indukcji rzędu 0,001 — 2,5 mT).

Do pomiarów natężenia pola magnetycznego stosuje się czujniki pętlowe, w których pod wpływem pola magnetycznego indukowany jest prąd, a do pomiarów indukcji pola magnetycznego wykorzystuje się czujniki oparte na zjawisku Halla

lub zjawisku Gaussa. Zjawisko Halla polega na indukowaniu pod wpływem pola magnetycznego pola elektrycznego poprzecznego w płytce półprzewodnika, wzdłuż której płynie prąd elektryczny. Czujnik oparty na zjawisku Halla (Hallotron) stanowi w istocie prostopadłościenną płytkę półprzewodnikową, w której na dwóch przeciwległych krawędziach umieszczone są dwie elektrody prądowe, do których doprowadzany jest prąd sterujący I ; pośrodku dłuższych krawędzi płytki umieszczone są dwie elektrody, w których powstaje napięcie U . W wyniku działania pola magnetycznego na elektrody obciążone prądem sterującym I powstaje napięcie w elektrodach U zwane napięciem Halla. Podstawową charakterystyką hallotronu jest liniowa zależność napięcia Halla od iloczynu $I \times B$, gdzie I oznacza natężenie prądu sterującego w elektrodach prądowych, a B oznacza indukcję magnetyczną w teslach. Przyrząd do pomiaru stałego i wolnozmiennego pola magnetycznego z zastosowaniem hallotronu wyskalowany w jednostkach indukcji B (tesle) nazywa się teslomierzem.

Zjawisko Gaussa oznacza magnetorezystancję, czujnik (gaussotron) jest rezystorem półprzewodnikowym o dużym przyroście rezystancji w polu magnetycznym, a przyrząd do pomiaru pola magnetycznego z zastosowaniem gaussotronu wyskalowany w jednostkach CGS strumienia magnetycznego B (gausy) nazywa się gaussomierzem. Zależność przyrostu rezystancji od natężenia pola magnetycznego jest różna w przypadku słabych i silnych pól magnetycznych.

Do pomiaru bardzo słabych pól magnetycznych, jak na przykład towarzyszących zjawiskom elektrycznym podczas pobudzenia nerwów, pracy serca i mózgowia, wykorzystuje się zjawisko nadprzewodnictwa w spiralach zanurzonych w ciekłym helu. Czujniki do tego typu pomiarów nazywane są nadprzewodzącymi czujnikami kwantowymi zakłóceń (SQUID — superconductive quantum interference device).

Pomiary pola magnetycznego w otoczeniu urządzeń będących źródłami stałego lub wolnozmiennego pola magnetycznego oraz na stanowiskach pracy przy takich urządzeniach wykonuje się w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach i oblicza wypadkowy strumień indukcji B

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

Tak obliczona wypadkowa indukcja B służy za podstawę oceny narażenia na pole magnetyczne według dopuszczalnych wartości indukcji.

I. Indukcja B urządzeń zasilanych prądem 50 Hz. Przykłady stwierdzonych wartości indukcji B i natężeń H pól magnetycznych (* — oznacza wyniki własnych pomiarów):

- suszarka do włosów, mieszkadło magnetyczne	1 — 2,5 mT
- golarka elektryczna, lampa fluorescencyjna stołowa	0,5 — 1 mT
- mikser kuchenny, transformator mocy, telewizor kolorowy *	0,1 — 0,5 mT
- odkurzacz, telewizor czarno-biały *, poduszka elektryczna	0,01 — 0,1 mT
- kalkulator elektroniczny, żelazko elektryczne	0,001 — 0,01 mT
- łuk spawalniczy	0,1 — 0,5 mT
- linie wysokiego napięcia (1 m nad ziemią pod linią)	10 μ T/kA
- hutnicze piece łukowe (zasilane prądem 1-20 kA) *	0,04 — 10 mT

II. Indukcja B urządzeń zasilanych prądem stałym i magnesów:

- | | |
|---|-------------|
| - magneśnica (80 V i 60 A) do magnesowania biegunów magnesów* | 4,8 – 76 mT |
| - iskrownik do silnika motoroweru (w różnych odległościach)* | do 40 mT |
| - instalacja elektryczna wanien elektrolitycznych* | 0,5 – 40 mT |
| - urządzenia do produkcji stałych magnesów | 5 – 90 mT |
| - defektoskopy magnetyczne | 7,5 – 35 mT |
| - reaktor termonuklearny: na stanowisku pracy | 7 – 45 mT |
| w promieniu do 500 m | 0,1 – 7 mT |
| - spektrometr NMR do badań obrazowych w medycynie | 1 – 300 mT |

Na stanowiskach pracy przy wyrobie trwałych magnesów stwierdzono: wartości pól magnetycznych działające na ręce – 150 – 5000 Oe (11,94 – 398 kA/m), na tułów pracowników – 30 – 750 Oe (2,39 – 59,7 kA/m) oraz najczęściej występujące (przy 80% czasu pracy) na poziomie rąk) – 24 – 900 Oe (1,91 – 71,64 kA/m) i na poziomie tułowia – 10 – 250 Oe (0,796 – 19,9 kA/m) [Vyalov, 1971].

T a b e l a 7

Jednostki fizyczne stosowane w pomiarach pól magnetycznych

Wielkość	Układ CGS	Układ MKSA	Współzależności
Strumień	linia	weber (Wb)	$1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ linii}$
Gęstość strumienia B	gaus (G^*)	tesla (T)	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ G}$
Natężenie pola H	ersted (Oe)	amper na metr (A/m)	$1 \text{ Oe} = 79,58 \text{ A/m}$

*Pola geomagnetyczne podaje się także w jednostkach gamma: $1 \text{ G} = 10^5 \text{ gamma}$.

Still biogeochemical?

Działanie pola magnetycznego na materiały biologiczne napotykało trudności interpretacyjne, głównie z powodu przenikalności magnetycznej (μ) tego materiału porównywalnej z przenikalnością magnetyczną wolnej przestrzeni (μ_0). Dopiero gdy w 1973 r. Cohen wykrył obecność małych ilości materiału ferromagnetycznego (γ -Fe₂O₃) ~~lub ferrimagnetycznego~~ w organizmie ludzkim, uzyskane zostały podstawy do ukierunkowania badań mających na celu bliższe poznanie wpływu pola magnetycznego na poziomie komórkowym. Wymienionej obserwacji dokonano w czasie badań pola magnetycznego wynikającego z prądów elektrycznych serca. Okazało się, że po magnetyzacji (działaniu silnego pola magnetycznego) organizmu lub jego części utrzymuje się "pole magnetyczne reszkowe", które można wykorzystać do identyfikacji cząstek będących zanieczyszczeniami w organizmie, zwłaszcza w płucach. Ustalono także, że to reszkowe, pozostałe pole magnetyczne w płucach maleje 6-krotnie w ciągu pierwszej godziny po magnetyzacji. Jednakże wiadomo, że magnetyzacja cząstki jest stała, a więc stwierdzony spadek natężenia pola reszkowego mógł być wynikiem tylko przypadkowej rotacji cząstki poza początkowym jej kierunkiem podczas magnetyzacji. Cohen nazwał ten proces "relaksacją" i przypisał go nie zidentyfikowanemu procesowi życiowemu sterującemu ruchem cząstek zatrzymanych w płucach (np. ruchy oddechowe płuc, pulsacje ser-

cowo-naczyniowe, falowanie rzęsek nabłonka, przepływ płynu powierzchniowego i śluzu, perystaltyka żołądkowo-jelitowa, ruchy Browna i ruchy cytoplazmatyczne komórek zawierających cząsteczki γ - Fe_2O_3).

(Tkanki organizmu wykazują bądź słabe właściwości paramagnetyczne, bądź słabe właściwości diamagnetyczne. Oznacza to, że składniki ciała łącznie z białkami zawierającymi żelazo nie wykazują resztkowego pola magnetycznego po zastosowaniu i przerwaniu działania pól magnetycznych. Cząstki ferromagnetyczne cechują się regionami samoistnej magnetyzacji, zwanymi "domenami magnetycznymi", nawet wobec braku zastosowania pól magnetycznych. Dzięki temu można wykryć małe ilości zanieczyszczeń ferromagnetycznych i śledzić ich magnetyczną orientację. Właściwości ferromagnetyczne nie odnoszą się do poszczególnych molekuł, ale do oddziaływań międzymolekularnych w danym materiale, i na przykład materiał ferromagnetyczny w roztworze traci właściwości magnetyczne. (Materiał ferromagnetyczny ulega trwałej magnetyzacji pod wpływem silnego pola magnetycznego, tj. ≥ 50 mT, powodującego narastanie liczby domen zorientowanych i rotacje innych domen wzdłuż linii sił działającego pola. W przypadku Fe_2O_3 domeny dostosowują się z dużą prędkością wynoszącą $\sim 35 \mu\text{m}/\mu\text{s}$. Te ruchy domen utrzymują się po ustaniu działania zewnętrznego pola magnetycznego, co wyraża się resztkowym polem magnetycznym. Resztkowa magnetyzacja utrzymuje swoją wielkość i kierunek nawet w obecności zmieniających się pól magnetycznych, dopóki nie nastąpi przekroczenie koercyjnego natężenia pola H_c . Koercyjność "twardych" materiałów ferromagnetycznych (jak γ - Fe_2O_3) zmienia się od 5 do 250 mT i świadczy o sile niezbędnej do reorientacji domeny magnetycznej. Zbadano dokładnie swoiste właściwości magnetyczne cząstek tlenków żelaza ze względu na ich znaczenie w zapisie magnetycznym. Koercyjność, czyli opór na zmiany w magnetyzacji, zmienia się także zależnie od kształtu i wielkości cząstki. Koercja wydłużonej cząstki może być 10^4 razy większa niż całego materiału. Na ogół H_c zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do średnicy cząstki tak w odniesieniu do cząstek o jednej domenie, jak i do cząstek wielodomenowych. Jednakże w przypadku średnicy poniżej ~ 2 nm magnetyzacja cząstki jest niestabilna i zmienia kierunek samoistnie pod wpływem energii termicznej, przy czym koercyjność spada nagle do zera.

Cząstki ferromagnetyczne zawieszone w płynie reagują na jednorodne pole magnetyczne podobnie jak wskazówka kompasu, tj. obrotem wzdłuż linii sił magnetycznych z szybkością zależną od lepkości płynu zawieszającego. Dzięki temu tempo rotacji cząstki może służyć do pomiaru lepkości otaczającego ją płynu.

Interesujące są wartości charakterystycznej stałej czasowej ($\mathcal{T}$) reorientacji cząstki w płynach o różnych lepkościach: w wodzie o temperaturze 37°C ($\eta = 0,0007$ Pa-s), w glicerolu o temperaturze 25°C ($\eta = 1$ Pa-s) i w plazmie komórkowej w temperaturze 37°C ($\eta = 1200$ Pa-s). Pod wpływem pola H o indukcji 0,05 mT, 2,5 mT lub > 100 mT czas reorientacji cząstki wynosi odpowiednio: w wodzie 3,3 ms, 67 μs i 1 μs , w glicerolu 4,8 s, 0,1 s i 1,5 ns oraz w plazmie komórki 96 min, 2 min i 0,2 s. Czas reorientacji dyfuzyjnej ($\mathcal{T}_{\text{dyf.}}$) zależy od średnicy kuli wyrażającej objętość danej struktury. Dla takich kul

równoważnych o średnicy 11 nm, 2 nm, 0,43 nm i 0,03 nm czas reorientacji dyfuzyjnej wynosi odpowiednio: w wodzie 5,7 min, 2 s, 20 ms i 7 μ s, w glicerolu 5,7 dni, 0,8 godz., 29 s i 10 ms oraz w plazmie komórki 18,7 lat, 41 dni, 9,7 godz. i 12 s. Z powyższego zestawienia widać, że nawet tak słabe pole magnetyczne jak naturalne pole magnetyczne Ziemi (0,05 mT) powoduje reorientację cząstki w stosunkowo krótkim czasie i że czas ten wielce skraca się w przypadku coraz silniejszych pól magnetycznych. Czas rotacji dyfuzyjnej jest natomiast tym krótszy, im mniejsze rozmiary ma materiał biologiczny.

Cząstki ulegające magnetyzowaniu wywierają siły wzajemnie na siebie. Zawieszone w wodzie cząstki magnetyczne reorientują się wzdłuż linii sił ziemskiego pola magnetycznego w ciągu kilku milisekund, a że energia tego oddziaływania wynosi ~ 200 kT, cząstki utrzymują taką orientację.

Zanik resztkowego pola magnetycznego w tkankach i komórkach, czyli relaksacja, spowodowany jest inną rotacją cząstek niż początkowe ukierunkowanie wzdłuż linii sił pola działającego. W miarę rotacji cząstek udział ich pola magnetycznego ulega likwidacji i pole resztkowe słabnie. Rotacją cząstek mogą sterować następujące mechanizmy [Valberg i Butler, 1987]: 1) chwanie pod wpływem pól magnetycznych, 2) elastyczne wtórne zwijanie spiralne, 3) przypadkowa dyfuzja rotacyjna, 4) przepychanie organelli przez napięcia liniowe. Maksymalne pole resztkowe otrzymuje się w wyniku magnetyzacji do wysycenia, co wymaga ~ 125 mT w przypadku γ -Fe₂O₃. Należy tutaj dodać, że ten tlenek żelaza ma układ krystaliczny według sieci typu spinelu (atomy metalu na pozycjach oktaedrycznych i tetraedrycznych oraz atomy tlenu też powiązane w sieci). Magnetyzację uzyskuje się pod wpływem stałego pola magnetycznego lub pola magnetycznego z cewek z przepływającym prądem (cewka Helmholtza). Ruch granicznych domen magnetycznych w nie przewodzących cząstkach jest szybki (~ 35 μ m/ μ s) i stąd całkowita magnetyzacja małych cząstek następuje w ciągu < 1 μ s. W tak krótkim czasie nie następuje rotacja cząstki [Valberg i Butler, 1987].

W 1979 r. [Walcott i współaut.] wykazali duże zagęszczenie cząstek magnetytu (Fe₃O₄) w głowie – dokładnie w różnych miejscach opon mózgowych – i w mięśniach szyi gołębi i niektórych innych zwierząt. W 1983 r. opublikowano po raz pierwszy wyniki badań [Baker i współaut.] wskazujące na to, że są miejsca dużego nagromadzenia cząstek magnetytu i w głowie człowieka – w cienkich i bardzo twardych blaszkach kostnych zatok kości klinowej i sitowej znajdujących się w przedniej części czaszki pod nasadą środkowej części kości czołowej. A więc tak u zwierząt, jak i u człowieka zgrupowania cząstek magnetytu stanowiących potencjalne receptory pól magnetycznych znajdują się w obrębie głowy lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie (szyja). Ma to istotne znaczenie ze względu na bezpośrednią bliskość ośrodkowego układu nerwowego i zlokalizowanych tam ważnych ośrodków regulacyjnych.

Z biologicznego punktu widzenia istotne znaczenie ma asymetria biochemiczna oceniana skręcalnością optyczną związków biochemicznych. Przeprowadzono wiele syntez chemicznych w silnych polach magnetycznych. Syntez tych nie udało

się jednak powtórzyć. Przypuszczano, że chodziło o trudności w odtworzeniu chiralnej (wywierającej siły skręcalne) struktury pola magnetycznego. Powtórzone znane z piśmiennictwa trzy reakcje chemiczne prochiralne, ale w polu magnetycznym 1,1 T zorientowanym względem osi geometrycznych Ziemi, tj.: 1) redukcję racemicznego 1-bromo-1-metyl-2,2-dwufenylo-cyklopropanu; 2) epoksydację transstilbenu i 3) epoksydację izoforonu. Wszystkie reakcje w ciągu 4 godzin lub krócej. Znak rotacji optycznej produktów reakcji zależał od orientacji makroskopowej pola magnetycznego, co świadczyło o tym, że synteza asymetryczna była wynikiem ciralnej struktury pola. W każdej reakcji skręcalność optyczna produktów otrzymanych w tym samym dniu ulegała zmianie po odwróceniu pola magnetycznego. Przemawia to za tym, że synteza asymetryczna była wynikiem reakcji przebiegającej w polu o chiralnej strukturze, w której składnik biegunowy nie ulega odwróceniu po odwróceniu pola magnetycznego. Pewne argumenty świadczą o tym, że pole biegunowe musi mieć charakter grawitacyjny. Przeprowadzone reakcje wskazują na to, że biegunowy składnik pola musi być także dynamiczny. Przemawia za tym fakt, że rotacja produktu nie zmieniała się wyraźnie, gdy pole zmieniono z horyzontalnego na pionowe względem powierzchni Ziemi. Fakt, że znak zbadanej rotacji optycznej produktu ulegał odwróceniu we wszystkich trzech reakcjach, gdy odwrócono pole magnetyczne w reakcjach przeprowadzonych w tym samym dniu, świadczy, że albo obserwowana synteza asymetryczna była wynikiem reakcji w chiralnym polu fizycznym, albo wchodziły w grę krańcowo niezwykle procesy stochastyczne. W piśmiennictwie do tej pracy zacytowano następującą teoretyczną uwagę dyskusyjną: "Obserwowano rotacje dodatnie i ujemne. Efekt ten nie mógł być regulowany, ale był raczej współistniejący. Jednakże można to łatwo wyjaśnić: na przykład znak zależy od fazowej zależności pól (magnetycznego i zmiennego elektrycznego). W przypadku częstotści 50 Hz długość fali wynosi wiele tysięcy kilometrów, a więc nie jest niespodzianką, że zależności pól nie mogą być odtwarzane z większą lub mniejszą regularnością". Należy tutaj dodać, że w czasie przeprowadzania reakcji do zlewki przyczepiona była spirala, przez którą przepuszczano prąd 60 Hz i dodatkowo przez opór. W czasie przepływu prądu i działania pola magnetycznego obserwowano wibracje płynu w zlewce. W rozważaniach swoich autorzy wysunęli możliwą do przyjęcia sugestię, że zmiany lokalne krzywizny przestrzeni zależne od ruchów planetarnych i księżyca mogą oddziaływać z falami grawitacyjnymi powodującymi wpływy zakłócające, po części odpowiedzialne za zmianę rotacji zerowej: nierównej produktów 2 i 3 będących przedmiotem syntezy 1) 1-metylo-2,2-dwufenylopropan, 2) tlenek izoforonu, 3) izoforon [Piotrowska i współaut., 1980]. Przytoczone powyżej badania i rozważania świadczą o trudnościach interpretacyjnych w odniesieniu do zjawisk obserwowanych w prostych układach chemicznych w warunkach działania silnego pola magnetycznego. Dla powtarzalności wyników badań niezbędne jest ścisłe sprecyzowanie naturalnych sił w funkcji czasu, przede wszystkim zaś układu linii sił pola magnetycznego naturalnego; w razie stosowania sztucznego pola (prądu) elektromagnetycznego istotne znaczenie ma fazowy układ składowych pól magnetycznego i elektrycznego. Te wpływy pola e-m na swoiste reakcje chemiczne mogą być wykorzystane do detekcji modulowanych pól

e-m krańcowo małej częstości. Przykłady trudności interpretacyjnych w odniesieniu do prostych reakcji chemicznych ukazują, jak bardzo skomplikowana jest sprawa interpretacji działania pól e-m na złożone materiały biologiczne in vitro i in vivo.

Wykazano in vivo i in vitro wpływ zmniejszonego i zwiększonego o 50% ziemskiego pola magnetycznego na czynność enzymów hydrokсыindolo-O-metylotransferazy (HIOMT) i N-acetylo-serotoninotransferazy (NAT). Enzymy te katalizują biosyntezę melatoniny w szyszynce i w siatkówce. Przedstawiono wyniki potwierdzające hipotezę o wrażliwości molekularnej na pole magnetyczne jako podstawie detekcji pola magnetycznego przez zwierzęta (hipoteza Leaska i Schultena). Melatonina w ustroju zwierzęcym jest przekąźnikiem warunków środowiskowych, w wyniku czego następuje: zmiana zabarwienia skóry u kijanek, hormonalna regulacja czynności gonad, adaptacja siatkówki do światła. Ekranowanie naturalnych pól e-m desynchronizuje w znacznym stopniu rytmy, nawet gdy zachowano percepcję światła. Sztuczne pole magnetyczne o natężeniu naturalnego pola magnetycznego wpływało na nocną biosyntezę melatoniny w szyszynce szczurów i na nocną syntezę melatoniny w szyszynce i w siatkówce ptaków. Stwierdzono także reakcję nocnego widzenia u ludzi na spadek o 50% indukcji ziemskiego pola magnetycznego [Cremer-Bartels i współaut., 1984]. Wymienieni autorzy przeprowadzili własne badania doświadczalne nad syntezą melatoniny u ptaków. W obszarze przeprowadzania doświadczeń naturalne pole magnetyczne Ziemi wynosiło w kierunku horyzontalnym $B_H = 19\ 000\ \text{nT}$ i w kierunku pionowym $B_V = 44\ 000\ \text{nT}$. Sztuczne pole magnetyczne uzyskiwano w cewce Helmholtza ustawionej osią długą równoległą do linii naturalnego pola magnetycznego. Wahanía sztucznego pola magnetycznego wewnątrz cewki wynosiły około $24\ 000\ \text{nT}$ i były większe niż dobowe wahanía naturalnego pola magnetycznego wynoszące poniżej $100\ \text{nT}$. Stwierdzono zmniejszenie o 22% czynności HIOMT w surowym wyciągu z siatkówki kurcząt trzymanyh w polu magnetycznym zmniejszonym o 50% w stosunku do naturalnego pola ziemskiego. Narażenie w ciągu 10 min nie powodowało zmian HIOMT. Wynik ten był zgodny z badaniami na pszczołach, u których reakcja na zmiany pola magnetycznego występowała z opóźnieniem wynoszącym co najmniej 10 min. Izolowana siatkówka nie reagowała na sztucznie obniżone pole magnetyczne. Działanie zwiększonego 50% pola magnetycznego istotnie zmniejszyło czynność HIOMT w szyszynce in vivo u przepiórki japońskiej. Procentowy spadek czynności tego enzymu był także istotny w odpowiedzi na 50% zwiększenie pola magnetycznego. Czynność NAT wykazywała tendencję wzrostu pod wpływem zwiększonego pola magnetycznego. Wykazano znaczne obniżenie czynności NAT w siatkówce po narażeniu na zmniejszone o 50% pole magnetyczne. Podane wyniki doświadczeń z narażeniem na zwiększone o 50% pole magnetyczne in vivo i in vitro wskazują na pośrednictwo w reakcji bliżej nie zidentyfikowanych związków o małym ciężarze cząsteczkowym (LMW fractions – frakcje o małym ciężarze cząsteczkowym). Wiadomo, że takie związki heterocykliczne, jak triamterene, 6-formylopterydyna, chloropropamina i haloperidol obniżają czynność HIOMT in vivo i in vitro. Możliwe, że tego typu substancje mogą przekazywać zmiany naturalnego pola magnetycznego do układów biologicznych.

Wpływy zwiększonego lub zmniejszonego o 50% pola magnetycznego na biosyntezę melatoniny potwierdzają koncepcję, że szyszynka uczestniczy w mechanizmie zegara wewnętrznego (internal clock). Wyniki te świadczą także o ważnej roli siatkówki w dobowych i być może sezonowych regulacjach, w których bierze udział melatonina. Są też potwierdzeniem koncepcji, że środowiskowe pole e-m może działać jako dodatkowy wyznacznik (Zeitgeber) rytmów dobowych i sezonowych.

W dosyć wiarygodny sposób ustalono, że naturalne pole magnetyczne Ziemi i słabe sztuczne pola magnetyczne zmieniają czynność elektryczną szyszynki u ssaków i u ptaków oraz hamują nocną syntezę melatoniny. Z tych względów zbadano wpływ stałego pola magnetycznego o indukcji typowej dla NMR na syntezę melatoniny w szyszynce na podstawie oznaczeń N-acetylotransferazy (NAT), enzymu biorącego udział w syntezie melatoniny, oraz na podstawie pomiarów ilości melatoniny w szyszynce. Badania wykonano w standardowych warunkach na dorosłych szczurach, które poddano działaniu pola magnetycznego przez 30 min o godz. 02³⁰ w tomografie dającym pole o indukcji 0,14 T. Stwierdzono, że pole magnetyczne o takiej indukcji nie wywarło wpływu na czynność NAT i na ilość melatoniny w szyszynce szczurów doświadczalnych w porównaniu z danymi u szczurów kontrolnych. Przytoczono też dane z piśmiennictwa o braku wpływu pola magnetycznego na poziom melatoniny w płazmie krwi u ludzi w porze nocnej. Brak wpływu silnego pola magnetycznego w przeciwieństwie do słabych pól magnetycznych na ilość melatoniny w szyszynce ssaków próbowano wyjaśnić tym, że wrażliwość ssaków na pole magnetyczne wykazuje podobne zależności jak inne układy czuciowe, tj. wykazuje czynność na bodziec określonego przedziału natężenia. Silne pole magnetyczne nie jest naturalne dla środowiska i dlatego pole magnetyczne towarzyszące działaniu NMR ma natężenia poza "okienkiem magnetycznym". Podano też, że innym możliwym do przyjęcia wyjaśnieniem może być uzależnienie wrażliwości szczurów na pole magnetyczne raczej od zmian orientacji pola niż od zmian jego natężenia. Stosowany w tych badaniach tomograf był ustawiony osią w kierunku północ-południe i zmienianym parametrem była wielkość indukcji pola magnetycznego [Reuss i współaut., 1985].

Hodowle heteroploidalnych L-929 i diploidalnych WJ-38 (fibroblasty) komórek ssaków trzymano zamrożone w temp. 4,2⁰K i w takim stanie poddawano działaniu pola magnetycznego 50 Hz o 5000 G przez 4-8 godz. W porównaniu z hodowlami kontrolnymi komórki trzymane w polu magnetycznym wykazały znaczne zahamowanie wzrostu. W hodowlach na szkiełkach nakrywkowych założonych w 7 dni po ekspozycji wyrastały morfologicznie odrębne komórki, które hodowano przez następne generacje. Po 3 tygodniach hodowli w butelkach zmierzono hamowanie kontaktowe. Zdaniem autorów stwierdzona transformacja komórek była spowodowana działaniem pola magnetycznego, gdyż wykluczono inne czynniki. Zastosowane natężenie pola magnetycznego i temperatura mogły spowodować, że do 20% spinów przyjęło układ wzdłuż linii sił pola magnetycznego. W dyskusji uzupełniono uzyskany wynik uważając, że opisane transformacje morfologiczne i fizjologiczne nie są równoznaczne z transformacjami nowotworowymi [Malinin i współaut., 1976].

Liczne makromolekuły i kompleksy biologiczne są anizotropowe magnetycznie i mają wyraźne momenty magnetyczne in vivo. Dzięki temu zewnętrzne pola magne-

tyczne mogą wpływać na ich czynności. Hodowle tkanek (jelito, mięsień, wątroba) 7-dniowych noworodków szczurów i hodowle flory jelitowej dorosłych szczurów poddawano działaniu pola magnetycznego 100 – 200 Hz o 5 mG zmienianego w sposób narastający w okresach 5-minutowych. W każdym doświadczeniu wykonywano 5 hodowli kontrolnych i 3 hodowle doświadczalne w temp. $37 \pm 0,01^{\circ}\text{C}$, stosując 2 g tkanki szczura na 1 butelkę oraz 1×10^8 komórek/ml w 1 hodowli (flora jelita szczura). Mierzono oddychanie hodowanych tkanek i komórek za pomocą różnicowego respirometru Gilsona. W początkowym okresie stosowania pola H komórki tkanek wykazały przejściowy spadek przemiany, a hodowle bakterii – stopniowy postępujący spadek przemiany. W porównaniu z hodowlami kontrolnymi spadek przemiany w tkankach szczurów wynosił $26,4 \pm 8,65\%$ w ciągu 10 min od zastosowania pola oraz zwiększenie przemiany o $36,9 \pm 11,96\%$ w okresie następnych 50 min i wreszcie spadek przemiany o $18 \pm 11,96\%$ w 30 min po ustaniu działania pola H. Bakterie jelitowe wykazały stopniowy spadek przemiany wynoszący $26,5 \pm 9,73\%$ po 90 min działania pola H bez oznak odnowy w następnej fazie hodowli. Z badań tych wynikało, że komórki eukariotyczne (tkankowe) są bardziej wrażliwe i łatwiej przystosowują się do działania pola H niż komórki prokariotyczne (bakteryjne). Różnica między komórkami eukariotycznymi a prokariotycznymi polega na odmiennej organizacji strukturalnej błony i przypuszczalnie podatność na działanie słabych pól magnetycznych może polegać na zależnościach rezonansowych i na zmianach fazowych wewnątrzkomórkowych kompleksów błonowych oraz zmianach ich konfiguracji. Pole magnetyczne może wpływać także na rezonansową allosteryczną modyfikację kompleksów łańcucha oddechowego [Russell i Webb, 1987]. Wychojąc z założenia, że progowa indukcja stałego pola magnetycznego do spowodowania wykrywalnych reakcji biologicznych u zwierząt wyższych wynosi 0,008 T (80 Oe), w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych stosowano pole o indukcji 0,008 T i 0,15 T [Gorczyńska i współaut., 1986]. Szczury Wistar, samce dorosłe (270), podzielono na 27 grup po 10 zwierząt, przy czym grupy I-IX obejmowały zwierzęta kontrolne, grupy X-XVIII zwierzęta poddane działaniu pola o indukcji 0,008 T, a grupy XIX-XXVII zwierzęta poddane działaniu pola o indukcji 0,15 T. Pole magnetyczne stosowano 1 godz. dziennie przez 7 tygodni. Źródłem pola H był elektromagnes chłodzony o odstępnie 22 cm między biegunami. Zwierzęta wkładano w pojemniki szklane pomiędzy bieguny i obserwowano, że ustawiły się długą osią wzdłuż linii sił pola magnetycznego. W odpowiednich odstępach czasu pobrano od zwierząt wątrobę i wyizolowano mitochondria, w których oznaczono metodą polarograficzną czynność enzymów I, II i IV kompleksu łańcucha oddechowego, tj. oksydoreduktazę NADH: ubikwion, dehydrogenazę kwasu bursztynowego i oksydazę cytochromową. Tempo oddychania z udziałem dehydrogenazy NADH, dehydrogenazy bursztynianowej i oksydazy cytochromowej zależało od czasu działania i natężenia pola magnetycznego. Zwierzęta wykazały większą wrażliwość na pole 0,008 T niż 0,15 T. Stwierdzone zmiany ulegały odwróceniu po 3 miesiącach od ustania działania pola H. W okresie stosowania pola H w ciągu pierwszego tygodnia działania pola o 0,008 T obserwowano oscylacyjne pobudzanie i osłabianie procesu oddychania, natomiast wyniki oddychania z udziałem I i II kompleksu



u zwierząt poddanych działaniu pola o 0,15 T były porównywalne do wyników u zwierząt kontrolnych. Po pierwszym tygodniu stosowania pola H stwierdzono zwiększoną szybkość oddychania z udziałem oksydazy cytochromowej pod wpływem pola o 0,15 T. Na ogół notowano zupełnie odmienny przebieg procesu oddychania u zwierząt poddanych działaniu pola o 0,008 T niż działaniu pola o 0,15 T. Inne dane wskazywały, że pole o 10 000 Oe nie powodowało większych wpływów na oddychanie niż pole o 80 Oe. Pole H o natężeniu poniżej 225 Oe pobudzało procesy oddychania, a o natężeniu powyżej 225 Oe hamowało oddychanie komórkowe. Autorzy opisanych wyników stwierdzają, że trudno im to zinterpretować i dać odpowiedź, dlaczego słabe pole magnetyczne wpływało na procesy oddychania w większym stopniu niż silne pole magnetyczne. Ich zdaniem chodzi być może o większą wrażliwość zwierząt na słabe pola magnetyczne, a może zwierzęta cechują się ograniczoną reaktywnością z uwagi na naturalne pole magnetyczne. W budowie NADH dehydrogenazy w centrum jest układ Fe-S-Fe, a w oksydazie cytochromowej – układ Fe-Fe. Być może, że różne były niezbędne wartości indukcji magnetycznej do wywarcia wpływu na różne enzymy oddechowe. Autorzy nie mogli dać odpowiedzi, który efekt pola magnetycznego jest silniejszy: na błony mitochondrialne czy na stan energetyczny jonów magnetycznych znajdujących się w strukturze enzymów oddechowych. Górczyńska [1986] stwierdziła w poprzednio opisanych badaniach, że pola magnetyczne wpływają na czynność trombolityczną przez proces koagulacji i fibrynolizy oraz na układ śródbłonkowo-płytkowy. Wiadomo też, że można uzyskać zmniejszenie skrzepu przez zwiększenie ilości prostacykliny w śródbłonku naczyń. Wychodząc z takich danych, wymieniona autorka poddała dorosłe szczury działaniu stałego pola magnetycznego 0,008 T lub 0,15 T 1 godz. dziennie przez 7 tygodni. Źródłem stałego pola magnetycznego był elektromagnes oporowy z układem chłodzenia. W czasie ekspozycji szczury poruszały się swobodnie w pojemnikach szklanych, ale nie podano wymiarów pojemników ani informacji o tym, czy szczury były umieszczone pojedynczo w pojemnikach, czy też całymi grupami po 12. Według podanych obserwacji szczury samoistnie układały się długą osią wzdłuż linii sił pola magnetycznego. W pobranej aorticie oznaczono prostacyklinę metodą biologiczną na podstawie siły niezbędnej do rozerwania agregatu płytek krwi. Agregację płytek uzyskano w plazmie bogatopłytkowej królików pod wpływem ADP (3 μ M). Na 60 s przed dodaniem ADP dodano prostacyklinę z aorty do bogatopłytkowej plazmy królików. Jako wzorca użyto syntetycznej prostacykliny (PGI₂). Siłę niezbędną do rozerwania agregatu płytek stosowano agregometr Borna (Agregometr ELVI 840). Uzyskane wyniki u zwierząt poddanych działaniu pola H różniły się istotnie od wyników u zwierząt kontrolnych, ale w 21 dni po ustaniu działania pola H zawartość prostacykliny w aorticie zwierząt doświadczalnych była taka, jak u zwierząt kontrolnych. Stwierdzone zmiany nie zależały od czasu narażenia na pole H, ale na ogół były proporcjonalne do natężenia pola. Po 7 tygodniach stosowania pola H stwierdzono następujące ilości prostacykliny w aorticie szczurów:

- | | |
|---------------------------------|-------------------------|
| - szczury kontrolne (12) | 4,89 $\pm$ 0,59 ng/mg |
| - szczury w polu o 0,008 T (12) | 11,52 $\pm$ 0,81 ng/mg |
| - szczury w polu o 0,15 T (12) | 13,36 $\pm$ 0,76 ng/mg. |



Ilość prostacykliny w funkcji czasu działania pola H była następująca: ng/mg aorty (średnia i standardowy błąd średniej):

	7 dni	14 dni	21 dni
- szczury kontrolne	4,68 $\pm$ 0,79	5,04 $\pm$ 0,83	5,10 $\pm$ 0,61
- szczury w polu o 0,008 T	8,34 $\pm$ 0,77*	7,11 $\pm$ 0,86*	5,53 $\pm$ 0,90
- szczury w polu o 0,15 T	9,25 $\pm$ 0,81*	7,92 $\pm$ 0,75*	6,06 $\pm$ 0,59

*Różnica istotna przy $p < 0,001$.

Autorka podanych wyników badań uważa, że pole magnetyczne wywiera działanie stresowe w organizmie, ale nie podaje na to uzasadnienia. Sugeruje, że zwiększenie ilości prostacykliny w naczyniach krwionośnych pod wpływem stałego pola magnetycznego może być wykorzystane w stanach pooperacyjnych, gdyż krótkotrwałe stosowanie pola magnetycznego przed zabiegiem operacyjnym może zapobiegać tworzeniu się skrzepów.

Zbadano włączanie JUDr (syntetyczny analog 5-jodo-2-dezoksyurydyny) pod wpływem kinazy tymidyny (TdR znaczonej ^3H lub ^{14}C) do DNA myszy i do izolowanych komórek szpiku kostnego myszy poddanych działaniu pola magnetycznego. Pod wpływem stałego pola magnetycznego o 0,2–1,4 T stwierdzono zwiększenie aktywności TdR-K i do uzyskania pełnego efektu pola o 1,4 T czas działania tego pola na myszy wynosił 30 min. Czynność tego enzymu wracała do poziomu wyjściowego w 5–10 min po narażeniu zwierząt. W innym doświadczeniu myszy najpierw napromieniano dawką 0,1 Gy promieniowania gamma (^{137}Cs), a następnie narażano bezpośrednio na pole magnetyczne o 1,4 T przez 30 min, utrzymując temperaturę zwierząt na poziomie 27°C . Promieniowanie gamma nie hamowało czynności enzymu w czasie stosowania pola H. Narażenie na pole magnetyczne oddalone w czasie od napromieniania gamma nie znosiło hamującego wpływu promieniowania gamma na czynność kinazy tymidyny. Wyniki tego złożonego układu badań przemawiają za hipotezą, że pole magnetyczne wpływa na czynność TdR-K pośrednio przez błonę komórkową [Feinendegen i Mühlensiepen, 1987]. Silne stałe pole magnetyczne może w istocie wpływać bezpośrednio na kurczliwość komórek mięśniowych. Pod wpływem pól magnetycznych może następować przemieszczanie grup spolaryzowanych w wyniku anizotropowej podatności składników komórki lub składników związanych z błoną komórkową. Składniki te mogą ulegać skręcaniu, co może wpływać na przepuszczalność błon i stąd na skurcz za pośrednictwem zmian w prądach jonowych poprzecznych w błonie. Poza tym zmiany konformacyjne enzymów pośredniczących w skurczu lub zmiany strukturalne kurczliwych filamentów mogą zmienić skurcz mięśnia serca bądź pośrednio przez sprzężenie elektromechaniczne, bądź bezpośrednio przez oddziaływania aktynomiozyny, tj. tak zwany mechanizm krzyżowo-mostowy (crossbridge mechanism). Należy mieć na uwadze także oddziaływanie silnego pola magnetycznego z poruszającymi się ładunkami, zwłaszcza w tym przypadku na wewnątrzkomórkowy przepływ aktywatora wapnia. Pomimo minimalnej odległości dyfuzyjnej od siateczki sarkoplazmatycznej do filamentów, i stąd prawdopodobnie małej prędkości jonów wapnia, nawet małe wahania w siatce mogą mieć związek ze skurczem. Do wystąpienia skurczu wystarczają krańcowo małe stężenia

Ca^{++} w cytoplazmie wynoszące 10^{-7} - 10^{-6} mola/l. Działanie stałego pola magnetycznego o 2,1 T nie miało ostrego wpływu na kurczliwość normalnie dotlenionego i niedotlenionego mięśnia serca szczura. Serce szczura wykazuje wyjątkowe cechy jakościowe, tj. czas potencjału czynnościowego jest krótszy i siateczka sarkoplazmatyczna bardziej rozciągliwa niż w sercu innych ssaków. Jednakże podstawowe mechanizmy pobudzenia i sprzężenia elektromechanicznego są jakościowo jednakowe u ssaków wszystkich klas. Tak więc według wszelkiego prawdopodobieństwa obecne ustalenia stosują się do innych ciepłokrwistych gatunków włącznie z człowiekiem. Pole magnetyczne o 2 T nie jest na tyle silne, aby wyciągnąć ogólny wniosek, że pola magnetyczne dowolnego natężenia nie mają wpływu na czynność serca. Ograniczenie przewodnictwa nerwowego może wystąpić w polu o indukcji 24 T i większej. Ograniczenie takie może być wynikiem oddziaływania pomiędzy polem magnetycznym i pętlami prądu przepływającego wzdłuż nerwów. W świetle przedstawionych powyżej wyników badań wywnioskowano, że stałe pole magnetyczne o indukcji stosowanej w obrazowaniu NMR nie stanowi ryzyka dla kurczliwości serca [Gülich i Lutz, 1986]. Inne badania zwróciły uwagę na zmiany rytmu serca w silnym polu magnetycznym [Jehensen i współaut., 1988]. Do badań zastosowano elektromagnes nadprzewodzący własnej konstrukcji (średnica cewki 53 cm) dający stałe pole magnetyczne o indukcji 8 do 2 T. Zbadano wpływ takiego pola na dobowy rytm serca przez monitorowanie EKG w ciągu 24 godz. Próby przeprowadzono u 12 zdrowych ochotników, rejestrując EKG na godzinę przed narażeniem, w ciągu godziny narażenia (aparat EKG był cały czas w polu o indukcji 8×10^3 T i był połączony z badanym ochotnikiem 5 przewodami niewrażliwymi na pole magnetyczne) oraz 22 godz. po narażeniu. Inne 4 osoby poddano działaniu pola 1 T. Osoby kontrolne (9) przebywały w polu 0 T. U poddanych działaniu pola 2 T średni cykl serca (CCL — cardiac cycle length) trwał $912 \text{ ms} \pm 83 \text{ ms}$ przed ekspozycją i stwierdzono u nich istotne wydłużenie o 17% CCL po 10 min narażenia, ale nie obserwowano dalszej istotnej zmiany trwania cyklu w czasie narażenia. CCL powrócił do stanu sprzed narażenia w 10 min po ustaniu narażenia. Nie zanotowano innych wpływów na rytm serca w czasie 24-godzinnego monitoringu. Nie stwierdzono statystycznie istotnych zmian rytmu serca u osób narażonych na pole 1 T i u osób kontrolnych. Zaobserwowano nakładanie się wywołanych polem magnetycznym potencjałów przepływu krwi na falę T w zapisie EKG. Wydłużenie CCL w czasie narażenia może być wynikiem bezpośredniego lub pośredniego wpływu pola magnetycznego na węzeł zatokowy, co jest prawdopodobnie nieszkodliwe u zdrowych ludzi. Autorzy zastrzegli jednakże, że należy sprawdzić, czy wpływ taki jest także bezpieczny u osób z dysrytmią.

Opisano zakłócenia w działaniu elektronicznego stymulatora serca u robotnika zatrudnionego przy dźwigu magnetycznym. Robotnik L. (52 lata) cierpiał na krótkotrwałe (chwilowe) zaniki świadomości. Zatrudniony był na stanowisku kranu magnetycznego o udźwigu 2 t. Badanie EKG wykazało u L. normalny rytm zatokowy o częstotliwości 62 uderzeń serca na minutę. Po uciśnięciu zatoki szyjnej wywoływano asystolię utrzymującą się w ciągu 3 s. Robotnikowi temu wszczepiono stymulator CORDIS 188A 709174, po czym powstał problem dalszej pracy L. na dotych-

czasowym stanowisku, na którym pracował 12 lat. Stanowisko to znajdowało się w odległości 3 m od dźwigu. Przeprowadzono badanie próbne, obserwując telemetrycznie działanie stymulatora u L. wykonującego swoje normalne zajęcie. Stwierdzono, że mechanizm wybiórczy stymulatora u L. przebywającego w odległości 15 cm od włączonego magnesu nieobciążonego dźwigu ulegał zakłóceniu, powodując pojawianie się parasystole. Z przeprowadzonych badań ustalono, że L. może wykonywać pracę przy dźwigu, ale winien przebywać w odległości większej niż 15 cm od włączonego magnesu dźwigu. Nie podano wartości indukcji magnetycznej na stanowisku pracy i w bezpośredniej bliskości magnesu dźwigu [Zeller, 1980].

Opisano przypadek narażenia na silne stałe pole magnetyczne w wyniku wypadku, jaki się zdarzył w 1985 r. Podczas montażu urządzenia NMR cylinder metalowy, w którym znajdował się technik, został z dużą siłą przyciągnięty do elektromagnesu dającego indukcję 0,5 T. Technik przesunięty został na odległość 6 m w komorze i uderzył ciałem z dużą siłą w przegrodę, doznając obrażeń i tracąc przytomność. Współpracownicy zorganizowali pomoc i po 20 min jeszcze przed całkowitym wygaszeniem elektromagnesu przybył zespół pogotowia ratunkowego. Wstępne badanie lekarskie w komorze wykazało tachykardię, normalne ciśnienie krwi, obrażenia głowy oraz złamania prawego przedramienia i kości udowej. Poszkodowanego wydobywano z komory, stosując kołnierz z materiału niemetalicznego i drewniane podkładki pod plecy. W warunkach szpitalnych potwierdzono rozpoznane zmiany. Zastosowano typowe leczenie ortopedyczne i po 18-dniowym leczeniu technik został wypisany w dobrym stanie zdrowia. Zespół pogotowia ratunkowego stwierdził po tygodniu od wypadku, że karty banku danych zostały rozmagnesowane podczas badania wymienionego technika w komorze NMR. Zwrócono uwagę na konieczność przestrzegania zasad bezpieczeństwa pracy przy montażu i stosowaniu urządzeń NMR [Fowler i współaut., 1986].

Najobszerniejsze badania nad działaniem pól magnetycznych na ludzi przeprowadzono w Związku Radzieckim. Na pracowników zatrudnionych przy wytwarzaniu trwałych magnesów działało pole magnetyczne o natężeniach 50 – 900 Oe na dłonie i na dolne części tułowia i 250 Oe na głowę; na pracowników kontrolujących defektoskopy magnetyczne – pole 100 – 350 Oe na poziomie rąk i 75 Oe na poziomie głowy. U pracowników zatrudnionych przez wiele lat na tych stanowiskach oraz u narażonych na pola magnetyczne z innych źródeł stwierdzono następujące zmiany chorobowe: zwolnienie lub przyspieszenie akcji serca, obniżenie ciśnienia krwi, zwiększoną drażliwość nerwową, łatwość męczenia się, zawroty głowy, utratę apetytu, bóle głowy, fale patologiczne w zapisie EEG, uczucie swędzenia i palenia w dłoniach, marmurkowatość i obrzęki skóry rąk.

Badania neurologiczne u 444 mężczyzn z wydziału elektrolizy huty aluminium zatrudnionych w narażeniu na czynniki toksyczne i na stałe pole magnetyczne o natężeniu rzędu kilku do kilkunastu tysięcy A/m (brak dokładnych danych) wykazały, że 123 miało wyraźne zmiany w stanie zdrowia, które można było powiązać przyczynowo z narażeniem zawodowym na kombinowane działanie zagrożeń fizycznych i chemicznych [Langauer-Lewowicka i Barszczyńska, 1983].

Przytoczone wyniki badań lekarskich świadczą o tym, że wieloletnie narażenie na pola magnetyczne powoduje wykrywalne zmiany w stanie zdrowia pracow-

ników. Pod wpływem bardzo silnych pól magnetycznych rzędu 100 000 G występuje uczucie zimna, bóle w kościach i mrowienie w rękach. W badaniach doświadczalnych na zwierzętach stwierdzono rozmaite niekorzystne działania pól magnetycznych, w tym i na rozwój embrionalny tych zwierząt. O działaniu biologicznym pól magnetycznych świadczy również ich zastosowanie w celach leczniczych. Słabe pole magnetyczne modulowane impulsowo stosowano w badaniach doświadczalnych i do celów leczniczych, np. do przyspieszenia uwapnienia i zrastania trudno gojących się złamań kości. Nie wszystkie wyniki zostały potwierdzone i nadal nie ma pewności, czy tego typu pole wywiera działanie biologiczne. Na uwagę zasługują badania wskazujące na hamowanie przez tego typu pole blastogennej reakcji limfocytów krwi obwodowej ludzkiej oraz pobudzanie takiej reakcji u ludzi zdrowych i chorych na przewlekłą białaczkę limfocytarną. Zastosowane pole magnetyczne w formie impulsów o indukcji szczytowej 4,5 T oraz czasie narastania i opadania wynoszącym 100 us. Maksymalna zmiana pola magnetycznego wynosiła 13 T/s, a maksymalna indukcja pola elektrycznego 23 mV/m. W takim polu trzymano przez 72 godz. próby krwi pobrane od 25 zdrowych osób (10 kobiet i 15 mężczyzn) w wieku 22-43 lat; inne próby krwi pobrane od 17 spośród tych osób trzymano w polu 12 godz. Z prób tych uzyskano frakcje komórek mononuklearnych, które przemyto 3 razy 10% unieczynnionej cieplą surowicy płodowej cielęcia. Badane próby miały objętość 200 ul/cylinderek. Dodano do (ale tylko do połowy liczby prób) fitohemaglutyninę w ilości 20 µg/ml. Dwie płytki z próbkami w cylinderekach inkubowano w 37°C przez 72 godz. w inkubatorze nawilżanym z dodatkiem CO₂, przy czym jedną z dwóch równoległych prób poddano działaniu impulsowego pola magnetycznego w ciągu 71 lub 12 godz., a drugą próbę ekranowano; wszystkie badania powtórzono 4-krotnie. Następnie dodano 1 uCi ³H-tymidyny do każdego cylinderek na 18 godz. przed zakończeniem 72-godzinnej narażenia na pole magnetyczne. W próbach poddanych działaniu pola magnetycznego przez 72 godz. stwierdzono ograniczenie o 60% włączania ³H-tymidyny. Nie było zaś różnic w próbach poddanych działaniu pola przez 12 godz. Zdaniem autorów badanie to wykazało hamujący wpływ impulsowego pola magnetycznego na mierzoną in vitro czynność odpornościową [Mooney i współaut., 1986]. W Szkole Medycyny Kosmicznej Sił Powietrznych USA (USAF School of Aerospace Medicine) przeprowadzono szeroko zakrojone badania na myszach w zakresie oceny immunokompetencji pod wpływem pól e-m. W wyniku tych badań stwierdzono pod wpływem ostrego lub przewlekłego efektu termicznego: limfopenię i neutrofilie, zwiększenie w śledzionie liczby limfocytów T i B, redukcję ciężaru grasicy i liczebności komórek w tym gruczole, osłabienie odczynów zapalnych [Liburdy, 1988], osłabienie nadwrażliwości odległej w czasie, hamowanie odrzucenia przeszczepów homologicznych. Tego typu zmiany rozmieszczenia i funkcji limfocytów są typowe dla stanu immunosupresji. W badaniach tych stwierdzono także zwiększenie poziomu kortykosteronu w plazmie krwi bezpośrednio po działaniu pola e-m. Postawiono hipotezę, że pola e-m pobudzając nadnercza w czasie termoregulacji, wpływają na układ odpornościowy w sposób podobny do działania glikokortykoidów na elementy układu odpornościowego [Liburdy, 1980]. Za tą hipotezą przemawiały dalsze

wyniki badań, wykazujące zmniejszenie o 37% odpływu z płuc do śledziony limfocytów znaczonych ^{51}Chr wstrzykniętych dożylnie myszom na 24 godz. przed ich poddaniem działaniu mikrofal 2,6 GHz c.w. o 25 mW/cm² w ciągu godziny (zwiększenie temperatury skóry o 2°C). Jednocześnie stwierdzono 3-krotne zwiększenie przepływu limfocytów śledziony do szpiku kostnego. Nie obserwowano wymienionych zmian po działaniu mikrofal o 5 mW/cm² i po działaniu ogrzanego powietrza. Dorosłe szczury samce poddano działaniu pola magnetycznego o fali prostokątnej i częstotliwości 50 Hz (indukcja 13,5 mT) lub o częstotliwości 2 Hz (indukcja 26,2 mT) w ciągu godzinnych okresów z godzinnymi przerwami 3-4 razy dziennie przez 8 dni. Z wątroby tych zwierząt wyizolowano komórki pozamiąższowe o właściwościach zabijaczowych dla komórek nowotworowych. Do badań cytologicznych użyto komórek chłoniaka (lymphoma) myszy dającego przerzuty i nie dającego przerzutów. Nadto działanie zabijaczowe komórek pozamiąższowych wątroby wymienionych wyżej szczurów zbadano in vivo u myszy z wszczepionymi komórkami nowotworowymi L 1210 (przeszczepialna białaczka). Wyniki badań wykazały, że zastosowane impulsowe pole magnetyczne zwiększało istotnie liczbę i czynność pozamiąższowych komórek zabijaczowych w wątrobie szczurów. Nie wykazano wpływu impulsowego pola magnetycznego na przebieg białaczki przeszczepialnej u myszy [Malter i współaut., 1987]. Przeprowadzono próby z dzielącymi się limfocytami ludzkimi, otrzymanymi od 5 mężczyzn i 5 kobiet, nad częstotścią podziałów mitotycznych i przerwaniach chromosomów pod wpływem pola e-m 60 Hz o gęstości prądu 30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ i indukcji pola magnetycznego 0,1 mT lub 0,2 mT stosowanego przez 69 godz. Nie stwierdzono istotnych różnic badanych parametrów komórek kontrolnych i komórek poddanych działaniu pola E, pola H lub kombinacji tych pól [Cohen i współaut., 1986a]. W podobnych badaniach z użyciem limfocytów krwi obwodowej wymienionych osób i komórek limfoidalnych od pacjentów z zespołami niestabilności chromosomalnej nie stwierdzono w stosunku do komórek kontrolnych zmian ilościowych wymiany chromatyd siostrzanych, przyspieszenia cyklu komórkowego lub przerw chromosomów w komórkach poddanych działaniu zastosowanego pola e-m [Cohen i współaut., 1986b].

W leczeniu uporczywych bólów wywodzących się z nerwu trójdzielnego często stosuje się jako metodę leczenia z wyboru przecięcie przezskórne gałęzi tego nerwu wiązką promieniowania e-m (tzw. rizotomia nerwu trójdzielnego polem e-m częstotliwości radiowej). Metodę tę zaakceptowano szeroko ze względu na łatwość i skuteczność leczniczą jej stosowania. Jednakże mogą być niekiedy powikłania w postaci zapalenia opon mózgowych lub ropni płatów skroniowych. Od pojedynczych chorych wyizolowano z płynu mózgowodzeniowego i z jamy ustnej streptokoki (*Streptococcus mutans*), które najprawdopodobniej są aktywnie związane z wymienionymi powikłaniami. W jednej pracy przeglądowej podano 33 takie powikłania na 14 000 zabiegów, a w drugiej – 2 powikłania na 504 zabiegi. Nie podano interpretacji powstawania wymienionych powikłań, ale chodzić może nie o obniżenie odporności u leczonych ludzi, lecz o zwiększenie zjadliwości wymienionych bakterii [Torroba i współaut., 1987; tam też odpowiednie piśmiennictwo].

11. OCENA NARAŻENIA NA POLE MAGNETYCZNE

Należy przede wszystkim podkreślić to, że tak do stałych, jak i wolnozmiennych pól magnetycznych stosują się te same zależności fizyczne. Określenie "pole wolnozmienne" jest jakościowe i oznacza, że w istocie warunki są stałe lub prawie stałe, tj. że w dowolnych odcinkach czasu zmiany są wystarczająco powolne w ośrodkach przewodzących i izolujących i wykazują wartości równowagi w odniesieniu do wszystkich zmieniających się wielkości. Z tych względów przedstawione dotychczas propozycje dopuszczalnych wielkości pól magnetycznych stosują się do stałych i do wolnozmiennych pól magnetycznych.

Przed kilkudziesięciu laty podjęto w ZSRR prace nad określeniem dopuszczalnych natężeń pól magnetycznych z uwagi na ochronę zdrowia pracowników. W 1966 r. zaproponowano więc następujące dopuszczalne natężenia pól magnetycznych dla 8-godzinnego dnia pracy: 300 Oe (około 24 kA/m) w przypadku ekspozycji całego ciała i 700 Oe (około 56 kA/m) w przypadku ekspozycji tylko rąk pracownika. W wyniku dalszych badań i uzgodnień na szczeblu ministerstwa zdrowia ustalono wstępnie w 1971 r. dla 8-godzinnego dnia pracy dopuszczalne natężenie 300 Oe pól magnetycznych zakresu 0 – 60 Hz w przypadku narażenia rąk pracownika, przy czym zdawano sobie sprawę z tego, że na inne części ciała pracownika działały pola o znacznie mniejszych natężeniach. W 1978 r. wydano w ZSRR normę sanitarną dotyczącą dopuszczalnego natężenia pola magnetycznego: "Opredeljeno dopustimyje urowni wozdejstwa postojannyh magnitnyh polei pri rabotie z magnitnymi ustrojstwami i magnitnymi materialami", Moskwa, Ministerstwo Zdrowoochronienia SSSR, 1978 r. Norma ta podaje jako dopuszczalne natężenie pól magnetycznych 100 Oe = 8 kA/m (co odpowiada około 10 mT) bez względu na eksponowaną część ciała i na czas ekspozycji. Nie są nam znane merytoryczne podstawy ustalenia tej normy ani też przyjęty margines bezpieczeństwa. Na ogół w tego typu normatywach stosuje się współczynnik bezpieczeństwa 10, tj. dopuszczalne natężenie danego czynnika szkodliwego jest 10-krotnie mniejsze od natężenia powodującego wykrywalne progowe zmiany biologiczne.

Na podstawie propozycji normy radzieckiej Zakład Fizyki Doświadczalnej w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy (CIOP) w Warszawie, opracował projekt dopuszczalnych natężeń pól magnetycznych w 1972 r., przyjmując zasadę stref ochronnych. W celu sprawdzenia zasadności proponowanych dopuszczalnych wielkości pól magnetycznych przeprowadzono pomiary tych pól w kilku zakładach produkcyjnych. Pole magnetyczne mierzono teslomierzem oraz zestawem kombinowanym złożonym z woltomierza i anteny ramowej miernika mikrofal. Projekt CIOP-u zakładał następujące strefy i przedziały dopuszczalnych wielkości pól magnetycznych:

- | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|----------|----|
| - w strefie bezpiecznej | dopuszczalne natężenia pola | < 2 | Oe |
| - " " " " | pośredniej | 2 – 20 | Oe |
| - " " " " | zagrożenia | 20 – 500 | Oe |
| - w strefie niebezpiecznej | natężenie pola | > 500 | Oe |

W strefie bezpiecznej dopuszczano przebywanie ludzi bez ograniczenia czasowego, z tym że natężenie pola w tej strefie nie powinno w istotny sposób różnić się

od naturalnego pola magnetycznego ziemskiego, tj. około 0,5 Oe. W strefie pośredniej dopuszczano przebywanie w ciągu 8 godz. dnia roboczego pracowników, u których badania lekarskie nie wykazały przeciwwskazań do pracy w narażeniu na pola magnetyczne. W strefie zagrożenia istnieje, zdaniem projektodawców, pewne ryzyko dla zdrowia i dlatego niezależnie od wymaganych kwalifikacji zdrowotnych pracowników ma obowiązywać skrócony czas pracy zależny od wielkości natężenia pola magnetycznego. Do wyznaczenia dopuszczalnego czasu przebywania pracowników w strefie zagrożenia zaproponowano następujący wzór

$$t_d(h) = \frac{160}{20 - 500 \text{ Oe}},$$

gdzie: $t_d(h)$ – dopuszczalny czas przebywania pracowników w godz.,

20 – 500 Oe – przedział dopuszczalnego natężenia pola magnetycznego w strefie zagrożenia.

W strefie niebezpiecznej nie dopuszczano przebywania ludzi ze względu na możliwość powstania u nich nieodwracalnych zmian w stanie zdrowia pod wpływem zbyt silnych pól magnetycznych, zwłaszcza powyżej 500 Oe. W odniesieniu do zaproponowanych normatywów wykonane pomiary pól magnetycznych wykazały następujące natężenia: około 60 Oe przy instalacjach elektrycznych waniach do elektrolizy aluminium, około 7 Oe przy generatorze prądu w elektrowni, około 16 – 80 Oe przy defektoskopie oraz około 170 Oe wewnątrz cewki demagnetyzatora. Tak więc stwierdzone natężenia pól magnetycznych mieściły się w przedziałach natężeń proponowanych w strefie pośredniej i w strefie zagrożenia.

W krajach zachodnich od szeregu lat proponowane są dopuszczalne natężenia pól magnetycznych na podstawie następujących wyników badań u ludzi narażonych na pola magnetyczne z racji wykonywania zawodu lub poddanych celowo działaniu pól magnetycznych o różnych natężeniach.

Pola magnetyczne (G)	Czas ekspozycji	Stwierdzone zmiany u ludzi
2 500	niesprecyzowany	brak dolegliwości, brak zmian częstości tętna i częstości oddychania
15 000	niesprecyzowany	wrażenia smakowe w jamie ustnej
20 000	15 min	uczucie bólu w zaplombowanych zębach
niesprecyzowane	niesprecyzowany	drażliwość, zmęczenie, osłabienie, osłabienie łaknienia, bóle głowy, przyspieszenie lub zwolnienie akcji serca, spadek ciśnienia krwi, pieczenie, palenie, obciążenie rąk, zmiany w EEG
100 000	krótki	uczucie zimna, bóle w kościach i mrowienie w rękach
5 000	3 dni rocznie	brak wykrywalnych zmian

Znane są dotychczas następujące propozycje dopuszczalnych natężeń pól magnetycznych zgłoszone w krajach zachodnich:

I. Propozycja podana w 1962 r. w USA

narażenie krótsze niż 3 dni w roku	2 000 G
narażenie krótkotrwałe do 15 min. jednorazowo	20 000 G

II. Propozycja zgłoszona przez Centrum Akceleratora Liniowego w Stanfardzie w 1971 r. (USA)

eksponowana okolica ciała	narażenie w ciągu godzin	narażenie w ciągu minut
całe ciało lub głowa	200 G	2 000 G
przedramiona i ręce	2000 G	20 000 G

Zalecenia dodatkowe: 1) nie należy przebywać w polach magnetycznych bez potrzeby;

2) należy unikać narażenia przedramion i rąk na pola magnetyczne o wielkościach powyżej 20 000 G i narażenia całego ciała i głowy na pola magnetyczne o wielkościach powyżej 2000 G.

III. Propozycja wspólna amerykańsko-japońska z 1979 r.

narażona okolica ciała	narażenie w czasie		
	8 godz./dzień	< 1 godz.	< 10 min
całe ciało	10 mT	100 mT	500 mT
kończyny	100 mT	1000 mT	2000 mT

Przedstawione powyżej informacje dotyczące zmian w stanie zdrowia u ludzi pod wpływem naturalnych i przemysłowych pól magnetycznych z jednej strony oraz proponowanych dopuszczalnych wielkości pól magnetycznych z drugiej strony wskazują na to, że nie ma wyraźnie sprecyzowanych koncepcji w sprawie określenia racjonalnych normatywów w odniesieniu do wielkości pól magnetycznych i czasu narażenia. Radziecka norma sanitarna z 1978 r. i propozycja amerykańsko-japońska z 1979 r. pokrywają się w zasadzie w odniesieniu do podstawowej dopuszczalnej wielkości pola magnetycznego w przypadku narażenia w ciągu dnia pracy, tj. 10 mT, z tym że norma radziecka obowiązuje niezależnie od narażonej okolicy ciała i czasu ekspozycji w ciągu dnia pracy, zaś projekt amerykańsko-japoński odnosi tę wielkość pola magnetycznego do narażenia całego ciała w ciągu 8 godz. dziennie.

Z zestawienia przytoczonych norm i projektów norm wynika, że najbardziej racjonalny jest projekt CIOP. W odniesieniu do narażenia zawodowego pracowników w ciągu 8 godz. dziennie projekt ten dopuszcza 5-krotnie mniejsze wielkości pola magnetycznego (20 Oe jako górną granicę wielkości dla strefy pośredniej) niż to przewiduje sanitarna norma radziecka (100 Oe).

Wszystkie przedstawione normy i projekty norm wymagają weryfikacji na podstawie dalszych badań doświadczalnych i badań stanu zdrowia pracowników narażonych na przemysłowe pola magnetyczne. W pierwszym rzędzie niezbędne są poprawne i systematyczne pomiary pól magnetycznych na stanowiskach pracy, tak aby można było z całą pewnością wiązać zmiany w stanie zdrowia u pracowników narażonych z wielkościami tego narażenia. Należy bowiem pamiętać, że w bada-

niach doświadczalnych na zwierzętach ustalono progową wielkość 100 G pola magnetycznego do spowodowania zmian patologicznych w zapisie EEG.

W wyniku szybkiego rozwoju spektrometrii NMR całego ciała do celów diagnostyki obrazowej przyjęto następujące górne wartości graniczne natężenia pola magnetycznego, które uznano za nieszkodliwe w przypadku klinicznych badań NMR [Gülich i Lutz, 1986]:

Bureau of Radiological Health (USA)	2 T
National Radiological Protection Board (W. Brytania)	2,5 T
Bundesgesundheitsamt (RFN)	2 T

Według dotychczasowych wyników badań stałe pola magnetyczne o natężeniach stosowanych w diagnostyce obrazowej NMR nie stanowią ryzyka w odniesieniu do czynności serca.

12. USTALENIA DOTYCZĄCE ODCZUWANIA PRĄDÓW

W działaniu biologicznym prądów stałych, wolnozmiennych (do 1000 Hz) i szybkozmiennych (powyżej 1 kHz) należy odróżnić zmiany na skutek bezpośredniego kontaktu z tkankami i zmiany pod wpływem pola takich prądów. W przypadku bezpośredniego kontaktu z tkankami przewodnika, w którym płyną prądy, mogą mieć miejsce dwa stany: a) stan działania ciągłego; b) stan działania przejściowego, tj. krótkotrwałego działania w ciągu milisekund. W razie działania ciągłego omawianych prądów reakcja występuje bezpośrednio po włączeniu prądu, natomiast w stanie działania przejściowego reakcja występuje każdorazowo. Kontakt bezpośredni przewodnika, w którym płynie prąd 1 – 100 kHz, z tkankami daje podrażnienie nerwów, a zwłaszcza ich zakończeń, oraz pobudzenie mięśni, które reagują skurczem. Z tych względów nie stosuje się prądów do 300 kHz do cięcia, przyżegania i koagulacji tkanek. Praktycznie nie ma zależności pomiędzy efektami biologicznymi wynikającymi z bezpośredniego drażnienia tkanek prądami 1 – 100 kHz i efektami biologicznymi działania pól e-m pochodzących od tych prądów. Człowiek lub zwierzę mogą przebywać w polach o natężeniach kilku tysięcy V/m lub kilkuset A/m bez okazywania bezpośrednich objawów makroskopowych, z wyjątkiem wibracji skóry i włosów, natomiast w przypadku bezpośredniego działania prądów tego zakresu częstości można wyznaczyć natężenia progowe odczuwania tych prądów, natężenia powodujące wrażenia bólowe i natężenia powodujące migotanie komór serca. Dostatecznie duże natężenia prądów tego zakresu częstości mogą spowodować porażenie śmiertelne. Z kolei można obliczyć wielkość indukowanego prądu w tkankach i w ustroju podczas przebywania w polach omawianych prądów.

Standard IEC 479-1, cz. 1 (wyd. 1984) podaje następujące określenia:

1. Próg percepcji prądu zależy od wielu parametrów (powierzchnia ciała stykająca się z elektrodą, tj. pole kontaktu, warunki kontaktu: suchy, wilgotny, nacisk, temperatura) oraz od osobniczych cech fizjologicznych. W standardzie tym dla prądu 15 – 100 Hz przyjęto ogólną wartość progu percepcji 0,5 mA niezależnie od czasu działania prądu.



2. Próg puszczenia (elektrod) oznacza maksymalną wartość prądu, przy której osoba trzymająca elektrody może je puścić. Próg ten zależy od wielu parametrów (powierzchnia styku, kształt i wielkość elektrod) i od osobniczych cech fizjologicznych. W standardzie przyjęto dla prądu 15 – 100 Hz wartość 10 mA tego progu.

3. Próg migotania komór serca zależy od parametrów fizjologicznych (budowa ciała, stan czynności serca) oraz od parametrów elektrycznych (czas działania i droga przepływu prądu, rodzaj prądu).

W praktyce niezależnie od częstości omawianych prądów próg percepcji prądu oznacza najmniejszą wartość prądu, przy której człowiek odbiera jakiegokolwiek podniety (słabe mrowienie, szczypanie przy niższych częstościach oraz słabe ciepło przy wyższych częstościach). Próg puszczenia elektrod lub progowe natężenie prądu do odczuwania bólu oznacza najmniejszą wartość prądu, przy której człowiek stwierdza bardzo nieprzyjemne odczucia (praktycznie jak przy percepcji progowej, lecz znacznie silniejsze), z powodu których nie chce zdecydowanie dotykać nadal elektrody. Próg migotania komór serca oznacza najmniejszą wartość prądu mogącą spowodować migotanie komór.

Standard IEC, cz. 2 (wyd. 1987) wprowadza dodatkowy wskaźnik oceny działania prądów, tzw. faktor częstości F_1 oznaczający "stosunek progowego prądu odpowiednich efektów fizjologicznych danej częstości (f) do prądu progowego 50/60 Hz". Zaznaczono w uwadze, że "faktor częstości różni się w odniesieniu do percepcji i puszczenia elektrod oraz do migotania komór". Wymieniony standard IEC 479, cz. 2 wyróżnia w przedziale 1 – 100 kHz dwa podzakresy częstości: 1 – 10 kHz i 10 – 100 kHz. Przytoczone zostały następujące wartości ocenianych parametrów (patrz także tab. 8):

a) w przedziale 1 – 10 kHz:

dla progu percepcji faktor częstości $F_1 = 2,2 - 14$, tzn. prąd progu percepcji wynosi od 1,1 mA do 7 mA;

dla progu puszczenia elektrod $F_1 = 1,65 - 5,3$, tzn. prąd puszczenia elektrod wynosi 16,5 – 53 mA;

dla progu migotania komór odpowiednie wartości są rozważane;

b) w podzakresie powyżej 10 kHz (do 100 kHz):

dla percepcji natężenie progowe prądu zwiększa się od około 10 mA do 100 mA (wartości rms);

dla progu puszczenia elektrod i dla progu migotania komór brak nadal odpowiednich ustaleń z powodu braku danych faktycznych.

Natężenie prądu 50 Hz, powodujące progowe odczucia, wynosi 0,7 mA wartości szczytowej, a w pewnych warunkach (np. przy wysokiej temperaturze otoczenia) wynosi ono tylko 0,3 mA wartości szczytowej. W przypadku prądów zmiennych powyżej 1 kHz natężenie odczuwania progowego zwiększa się liniowo i w celu określenia tego natężenia progowego 0,7 mA wartości szczytowej należy pomnożyć przez częstość wyrażoną w kHz, nie przekraczając maksymalnego natężenia 70 mA wartości szczytowej, tj. odpowiadającego akurat wartości natężenia progowego 100 kHz ($0,7 \text{ mA} \times 100 = 70 \text{ mA}$ wartości szczytowej) [IEC 348, 1978]. Odczuwanie progowego wyładowania prądów standardów przejściowych



Zestawienie natężeń prądu do spowodowania: progowej percepcji, progowej wartości do puszczenia elektrod i progowej wartości migotania komór
wg IEC Publ. 479-1 i 479-2¹

Rodzaj odczucia progowego	Natężenia prądu zależne od częstości					
	prąd stały (0 C)	15 – 100 Hz (50/60 Hz)	100 – 1000 Hz	1 – 10 kHz	10 – 100 kHz	> 100 kHz
Próg percepcji	≈ 2 mA	≈ 0,5 mA	0,5 – 1,1 mA	1,1 – 7 mA	10 – 100 mA	kilkaset mA**
Próg puszczenia elektrod	≈ 300 mA	≈ 10 mA	10 – 16,5 mA	16,5 – 53 mA	brak danych	brak danych
Próg migotania komór	jak dla prądu zmiennego* (A C)	≈ 500 mA*	500 – 7000 mA	brak danych	brak danych	brak danych

* W przypadku działania prądu w okresie dłuższym niż wynosi czas trwania jednego cyklu pracy serca.

** Odczuwanie ciepła (a nie odczuwanie szczypania i mrowienia).

zależy od wieku, płci i stanu serca u poszczególnych osób. W odniesieniu do przeciętnej dorosłej osoby zależność pomiędzy natężeniem prądu stanu przejściowego i czasem przystosowania się organizmu określona jest wzorem [IEC 601-2-2, pt. 2, 1982]:

$$\text{prąd (mA)} = \frac{116}{t(s)}.$$

Jeśli czas włączenia prądu jest dłuższy niż czas pojedynczej akcji serca, to dopuszczalne jest niższe progowe natężenie prądu. Maksymalnie bezpieczny prąd stanu przejściowego wynosi poniżej 10 mA, natomiast prąd 20–40 mA przepływający przez klatkę piersiową może zakłócić i zatrzymać oddychanie, a prąd powyżej 50 mA, zależnie od czasu przepływu może powodować porażenie śmiertelne. Nawet tzw. bezpieczny prąd, 2–10 mA, może wywierać słabe działanie wstrząsowe, doprowadzając na przykład do upadku w przypadku pracy na wysokości. Zestawienie omówionych powyżej wartości prądów podano w tabeli 8. Na zmiany wymienionych powyżej progowych wartości prądów zmiennych wpływa niewątpliwie wybitnie nieliniowa reaktancja skóry ludzkiej na działanie tych prądów. Na przykład, kiedy przyjmujemy pojemność skóry $0,025 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$, reaktancja ta wynosi [Elden, 1971]:

1 Hz	63 000 000	cm^2
10 Hz	630 000	cm^2
100 Hz	63 000	cm^2
1 kHz	6 300	cm^2
10 kHz	630	cm^2
100 kHz	63	cm^2

Nadto oporność skóry zależy od wielu innych czynników, w tym także od wieku człowieka. Na przykład oporność skóry dłoni wynosi średnio $18,8 \pm 0,8 \text{ k}$ w wieku 20–29 lat i $32,7 \pm 4,2 \text{ k}$ w wieku 60–69 lat.

W przypadku działania prądów stanu przejściowego należy pamiętać także o zakresie dynamicznym, tj. o przedziale od natężenia odczuwania progowego do natężenia powodującego odczuwanie bólu. Przedział ten różni się istotnie w porównaniu z zakresami dynamicznymi bodźców innego rodzaju. Zakres dynamiczny, tj. przedział natężeń bodźca od wartości progowych odczuwania do wartości bólowych wynosi dla typowych bodźców:

1:100 000 w odniesieniu do bodźców wzrokowych i słuchowych;

1:1000 w odniesieniu do bodźców dotykowych;

1:3,5 lub 1:5,5 w odniesieniu do prądów stanów przejściowych, przy czym podane różnice zależą od okolicy ciała [Reilly i Larkin, 1984].

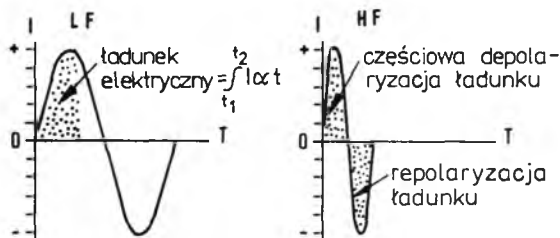
Przytoczone powyżej reakcje biologiczne występują pod wpływem bezpośredniego działania prądów wolnozmiennych i szybkozmiennych oraz tzw. stanów przejściowych. Nie odnosi się to do działania pól e-m tych zakresów częstości, ale podane reakcje wskazują pośrednio, że można spodziewać się nieliniowego działania pól e-m w omawianym przedziale częstości. Obliczenia teoretyczne i przybliżone pomiary wskazują, że do indukowania w tkankach prądu 10 kHz o gęstości 1 mA/cm^2 niezbędne jest pole e-m o natężeniu około 10^7 V/m [Bernhardt, 1979].

Przykład ten ilustruje kolosalną odmiennosć sytuacji, w których badane są efekty bezpośredniego działania prądów i efekty działania pól e-m tych prądów.

Mechanizmy oddziaływania pola 60 Hz (50 Hz) na obiekty biologiczne nie zostały wyjaśnione, tj. nie ma przekonujących dowodów na to, że pole E tej częstotliwości działa bezpośrednio na błony komórkowe, ani też że indukowany prąd w materiale biologicznym pod wpływem tego pola jest odpowiedzialny za wszystkie efekty biologiczne. W wyniku przewlekłego narażenia szczurów na pole E 60 Hz stwierdzono zwiększenie pobudliwości zwojów współczulnych [Jaffe i współaut., 1983], przejściowe zwiększenie wydzielania kortykosterydów przez nadnercza [Hackman i Graves, 1981], tłumienie rytmu dobowego w wydzielaniu melatoniny przez szyszynkę [Wilson i współaut., 1980], a także zmiany w zachowaniu zwierząt pod wpływem pola o natężeniu poniżej 10 kV/m [Stern i współaut., 1983]. Pole E 60 Hz może działać bezpośrednio na błony nerwowe poprzez indukowany prąd albo pośrednio przez pobudzenie receptorów czuciowych. Najprawdopodobniej na pole E 60 Hz reagują receptory czuciowe somatyczne w skórze (receptory wibracji, ruchów owłosienia, ciepła, ciśnienia). Przeprowadzono ściśle kontrolowane badania na znieczulonych kotach, u których odsłonięto rdzeń kręgowy okolicy lędźwiowo-krzyżowej i wyizolowano wiązki włókien nerwowych lub pojedyncze włókna nerwowe z korzonków tylnych rdzenia, zaopatrując dolną część nogi i stopę. Po zarejestrowaniu czynności pojedynczych włókien nerwowych zlokalizowano unerwiane przez takie włókna pola receptorowe oznaczające obszary, z których po pobudzeniu skóry lub owłosienia pochodziły impulsy w pojedynczych włóknach. Rodzaje receptorów zidentyfikowano na podstawie ich odpowiedzi na rozmaite bodźce. Receptory przystosowujące się szybko do działania pola E (RAF — rapidly adapting field receptors) zidentyfikowano na podstawie ich wyjątkowej czułości na wibracje z danych pól lub na ruchy pęczków włosów osłonowych. Po zidentyfikowaniu receptorów łapę kota poddawano działaniu pola E 60 Hz w specjalnym układzie cylindrów współosiowych, przy czym łapa kota znajdowała się w wewnętrznym uziemionym cylindrze. Cylinder zewnętrzny był elektrodą wysokonapięciową. Układ dostarczał maksymalne napięcie 9 kV, ale ze względu na potrzebę uniknięcia powstawania zjawiska koronowego do badań biologicznych stosowano napięcie 5,2 kV. Za pomocą czujnika przyspieszeń o czułości 1 mV/m/s^2 pokrywającego zakres 3 — 10 000 Hz mierzono wibracje w cylindrze wewnętrznym w pobliżu wystającej łapy kota, którą umieszczano w polu E. Wibracja zakłócająca wynosiła w relacji szczyt-szczyt do $0,05 \text{ m/s}^2$. Pole E mierzono sondą o promieniu 0,31 cm na podstawie indukowanego prądu. Równoważne pole elektryczne stanowiące 1,5-krotną wartość pola geometrycznego stosowano do przeliczenia zmierzonej wartości prądu w obwodzie na natężenie powierzchniowe pola E. W przypadku ograniczenia na elektrodzie napięcia do 5,2 kV maksymalne natężenie pola E działającego na łapę kota wynosiło około 600 kV/m. Poszukiwanie receptorów wrażliwych na pole E obejmowało dwie fazy. W pierwszej fazie zidentyfikowano i zbadano 245 receptorów rozmaitych typów u 27 kotów. Spośród tych receptorów na pole E reagowało 8 na 20 receptorów RAF, 1 na 35 receptorów RA-HF (szybko przystosowujących się na drgania dużej częstotliwości — rapidly adapting, high-frequency) będących ciążkami Paciniego oraz 1 na 22 receptory mieszka włosowego typ I. Najczulszymi na

pole E były receptory RAF, a średnio dla całej grupy 8 receptorów wynosiło 342 kV/m $\pm$ 44 kV/m (standardowy błąd średniej). Receptory reagujące na pole E nie wykazywały zmęczenia w czasie narażenia od 4 do 90 min. Maksymalna częstość uzyskanych impulsów pobudzeniowych wynosiła 120/s. W drugiej fazie badań ograniczono się tylko do receptorów RAF. Ponieważ tylko jeden spośród badanych receptorów RAF był zlokalizowany w skórze nieowłosionej, wydawało się, że vibracje włosów pod wpływem pola E pobudzały większość receptorów. Dalsze doświadczenia przeprowadzone po ostrzyżeniu i depilacji wykazały tylko nieznaczne obniżenie częstości pobudzenia nerwów, natomiast pokrycie zdepilowanej skóry warstwą oleju mineralnego zmniejszało lub niemal eliminowało częstość pobudzenia nerwów. Z opisanych badań wynioskowano, że wykazane receptory wrażliwe na pobudzenie polem E 60 Hz reagują na wywołane przez pole vibracje włosów i skóry, za czym przemawia ograniczenie częstości ich pobudzeń po usunięciu włosów i po pokryciu skóry olejem mineralnym. Tak więc badania te nie potwierdziły bezpośredniego oddziaływania energii pola E na błony neuronów [Weigel i współaut., 1987].

Reagowanie tkanek na sinuoidalny prąd zmienny zależy w dużym stopniu od częstości prądu, ale tkanki w pewnym stopniu dostosowują się (adaptują) i niezbędna jest określona ilość ładunku do spowodowania pobudzenia ich. W przypadku prądu zmiennego bardzo małej częstości komórka ma dostatecznie dużo czasu na przystosowanie się do powoli narastającego ładunku elektrycznego i do jej pobudzenia musi być dostarczony dostatecznie duży ładunek elektryczny na błonę do spowodowania depolaryzacji. W przypadku prądu zmiennego dużej częstości nie zdąży nagromadzić się dostatecznie duży ładunek elektryczny niezbędny dla depolaryzacji błony do chwili odwrócenia polarności prądu powodującego repolaryzację błony (rys. 3). Tak więc prądy zmienne dużej częstości są nieskuteczne jako bodźce, gdyż nie depolaryzują błony komórkowej. W sumie wrażliwość tkanek na prądy zmienne małych częstości jest stosunkowo mała ze względu na przystosowanie się tkanek, a z drugiej strony wrażliwość tkanek na prądy dużej częstości też jest mała ze względu na niedostateczną depolaryzację tkanek w czasie połowy pojedynczego cyklu prądu. Tkanki wykazują największą wrażliwość na prąd częstości około 50 Hz, gdyż przy niej wymienione powyżej zależności są minimalne [Randal, 1962].



Rys. 3. Pobudzenie prądem sinuoidalnym błony elementu pobudliwego (nerwu) [wg: Randal, 1962]

A — ładunek elektryczny prądu LF jest wystarczający do depolaryzacji błony i następuje pobudzenie; B — ładunek elektryczny prądu HF jest niewystarczający do zdepolaryzowania błony przed jej ponowną repolaryzacją

13. PROBLEMY DZIAŁANIA PÓL E-M

TO powrócić na
początku (odpowiedź)

Jednym z ważniejszych zagadnień w wyjaśnieniu działania pól e-m na obiekty biologiczne jest identyfikacja materiałów i ich właściwości fizycznych podatnych na działanie energii e-m. Należą tu woda i substancje rozpuszczone w wodzie oraz pasywne właściwości elektryczne tych materiałów i obecność w komórkach cząstek magnetycznych wykazujących zmiany położenia (ruchliwość). Bierne właściwości elektryczne, tj. przewodnictwo (δ), pojemność (F), przenikalność elektryczna (ϵ), materiałów, w tym także materiałów biologicznych, można zmierzyć w kondensatorze płaskim lub w urządzeniach będących odmianami kondensatora płaskiego. Przewodnictwo jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy gęstością prądu elektrycznego i polem elektrycznym, czyli jest to miara łatwości, z jaką "zdelokalizowane" nośniki ładunku mogą poruszać się w materiale pod wpływem pola elektrycznego. W materiałach uwodnionych biologicznych przewodnictwo wynika głównie z ruchliwości jonów wody i procesów podanych poniżej. Przenikalność elektryczna materiału (często zwana stałą dielektryczną) jest stosunkiem tej właściwości materiału do przenikalności (ϵ_0) wolnej przestrzeni, mającej wartość $8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$. Przenikalność jest proporcjonalna do stosunku ładunku do pól elektrycznych i ilustruje zasięg, w jakim "zlokalizowane" rozmieszczenie ładunków może ulegać zaburzeniu lub spolaryzowaniu pod wpływem pola elektrycznego. W materiałach biologicznych takie zlokalizowane ładunki występują głównie w podwójnych warstwach elektrycznych na powierzchniach błon lub wokół rozpuszczonych makromolekuł bądź z polarnymi molekułami, które mają stały dipolowy moment elektryczny [Pethig i Kell, 1987].

Podejmowano próby obliczeniowe i próby oparte na konkretnych pomiarach ilościowych oceny pochłaniania energii e-m odniesionego do składowych E i H. Według pomiarów i obliczeń Guya odnoszących się do pól mikrofalowych pochłanianie energii z wektora H jest o dwa rzędy wielkości większe niż z wektora E pod wpływem gęstości strumienia energii padającej 10 mW/cm^2 [Guy i współaut., 1976].

$$E \quad W = (194)^2 \times 26,4 \times 10^9 = 0,994 \times 10^{-3} \text{ W/kg}$$

$$H \quad W = (0,515)^2 \times 0,366 = 0,971 \times 10^{-1} \text{ W/kg},$$

gdzie: E – natężenie pola elektrycznego E w V/m,

H – natężenie pola magnetycznego H w A/m,

W – pochłanianie energii w W/kg.

Liczby w nawiasach są współczynnikami empirycznymi odnoszącymi się do wymiarów ciała człowieka.

Wykonane w 1984 r. badania doświadczalne na osobach dorosłych były nacełowane na ilościową ocenę pochłaniania energii e-m ze składowych wektorów E i H [Hill i Walsh, 1984]. W tym celu wykorzystano jedną z największych na świecie ekspozycyjnych komór TEM (transverse electromagnetic mode), w której uzyskuje się jednorodne pole e-m w znacznej objętości. Wykazano, że w przypadku orientacji ciała ludzkiego wzdłuż linii sił pola E o częstotliwości 7 – 40,6 MHz ponad 90%

pochłoniętej energii (średnio) pochodziło ze składowej E. Wyniki takie uzyskano, zadając równoważną impedancję falową w przedziale 188,5 – 754, tj. dwukrotnie mniejszą lub dwukrotnie większą od wartości 377 Ω .

14. BŁONY BIOLOGICZNE (KOMÓRKOWE)

Poszukiwanie wyjaśnienia mechanizmów działania pól e-m na komórki zwróciło zainteresowanie wielu autorów na błony komórkowe, które wykazują mieralne parametry elektryczne stanowiące odpowiednie podłoże działania pól e-m. W płaszczynie błon komórkowych znajdują się duże molekuły, głównie białek, poruszające się swobodnie w błonie jak i w lepkim płynie; w układzie poprzecznym składniki błon komórkowych ułożone są w warstwy o grubości błony 5-15 nm. Działanie pól e-m jest inne w każdej z tych płaszczyzn. Wnętrze komórek ma normalnie ładunek ujemny przewyższający o 50 – 150 mV ładunek płynu otaczającego, wynikiem czego jest poprzeczne pole elektryczne rzędu dziesiątków milionów V/m. W kierunku poprzecznym skuteczna oporność błony na jednostkę powierzchni przyjmuje wartość $R = 0,14 - 15 \Omega / m^2$. Odpowiada to oporności właściwej rzędu $\rho = 10^7 - 10^9 \Omega \cdot m$. W porównaniu z tymi danymi płyn otaczający i wnętrze komórki mają oporność właściwą około $\rho = 2 \Omega \cdot m$. Oznacza to, że błony komórkowe skutecznie ekranują wnętrze komórek przed zewnętrznymi polami e-m [Barnes, 1986].

Na podstawie wieloletnich badań właściwości dielektrycznych tkanki mięśniowej [Schwan, 1984] przedstawia interesujące podsumowanie na temat roli błon komórkowych w reagowaniu komórek na pola e-m. W przypadku pól LF wnętrze komórki jest skutecznie ekranowane przez błonę komórkową, która przejmuje cały potencjał kierowany poprzecznie na komórkę. W ten sposób zewnętrzne pola ulegają powieleniu (wzmocnieniu) o faktor R/d (R = promień komórki, d = grubość błony), licząc w poprzek błony. Fakty te wykluczają jakiekolwiek bezpośrednie oddziaływanie zewnętrznego pola LF na wnętrze komórki, ale błona komórki reaguje na tego typu pola o natężeniu rzędu 1 V/cm. W przypadku pól mikrofalowych błony wykazują krótkie zwarcia i nie ma znaczenia faktor wzmacniający R/d w ochronie komórki. W ten sposób wnętrze komórki jest całkowicie eksponowane na pole mikrofalowe i oddziaływanie błony komórkowej na pole mniej prawdopodobne. Każdy składnik komórki wykazuje odpowiednią wrażliwość zależną od częstotliwości pola mikrofalowego, wynikającą ze zjawiska "sprzęgania".

W oddziaływaniu pól e-m na materiały biologiczne istotne znaczenie mają podstawowe właściwości dielektryczne tych materiałów. Stała dielektryczna ϵ cechuje podatność tkanek na magazynowanie energii (względem takiej właściwości wolnej przestrzeni), natomiast przewodność σ jest miarą podatności tkanek na przewodzenie ładunków w polu e-m. Te dwie cechy stanowią podstawowe właściwości dielektryczne materii. Schwan [1984] nie rozpatruje właściwości magnetycznych tkanek, gdyż są one identyczne z właściwościami magnetycznymi wolnej przestrzeni. Stała dielektryczna osiąga olbrzymie wartości (ponad milion) w zakresie częstotliwości poniżej 100 Hz. W funkcji częstotliwości pól e-m stała dielektryczna wykazuje trzy nieliniowości (dyspersje): α dyspersja

może być odpowiedzialna za pobudzenie błon (?) i struktur wewnątrzkomórkowych (?), a jej przyczyną może być ładowanie się struktur wewnątrzkomórkowych połączonych z błoną zewnętrzną (system kanalików), efekty relaksacyjne jonu przeciwnego, cechy częstotliwościowe samej błony komórkowej; β dyspersja może być odpowiedzialna za zmiany strukturalne tkanek i zależy od polaryzacji błon komórkowych od strony cytoplazmy i od strony zewnętrznej komórki, gdzie znajdują się drogi przepływających prądów; γ dyspersja odpowiada za zmiany w tkankach z dużą ilością wody. Porównanie pomiarów *in vivo* i w tkankach wyciętych od zwierząt pozwoliło ustalić czas utrzymywania się właściwości relaksacyjnych tkanek. Okazało się, że α dyspersja zanika w ciągu kilku godzin, β dyspersja zanika w ciągu 2–3 dni, a γ dyspersja utrzymuje się w ciągu długiego okresu po pobraniu tkanki.

W działaniu pól e-m na ustrój żywy mogą odgrywać istotną rolę bezpośrednio połączenia pomiędzy komórkami. Sąsiadujące ze sobą komórki wytwarzają submikroskopijne bezpośrednie połączenia zwane złączami elektrotonicznymi lub bramkowymi (electrotonic junction, gap junction). Są to wyspecjalizowane struktury, które łączą przylegające błony dwóch komórek na odcinku około 3,5 nm; w połączeniu takim nie ma błon komórkowych, lecz istnieje bezpośrednia komunikacja między komórkami. Struktury takie widoczne są w mikroskopie elektronowym. Kanalityki połączeń elektrotonicznych stanowią bezpośrednią drogę komunikacji elektrycznej i metabolicznej, tj. umożliwiają przepływ jonów i molekuł o średnicy do 2 nm. Precyzyjne pomiary za pomocą elektrod wprowadzonych do komórek gruczołu łzowego szczura połączonych kanalikiem elektrotonicznym wykazały, że przewodnictwo w takim złączu wynosiło 70–180 pS (średnio 120 pS) w czasie pełnego otwarcia kanalik. Jednakże czasami rejestrowano nagły skokowy wzrost przewodnictwa do 5000 pS, co mogło świadczyć o zamknięciu kanalik [Neyton i Trautman, 1985]. Równie precyzyjne pomiary w 4 parach komórek mięśniowych komór serca u 7-dniowych zarodków kurzych potwierdziły zjawisko otwierania i zamykania kanalików złączowych. Czas otwarcia wynosił 16 ms do 4 s, średnio 332 ± 459 ms, a średni czas zamknięcia wynosił 1740 ± 476 ms. Przewodnictwo w kanalik złączowym wynosiło średnio 164 ± 26 pS w czasie otwarcia kanalik. Ustalono także, że spontaniczne otwarcia i zamknięcia kanalików złączowych następowały nagle i trwały 10-krotnie krócej, niż podano w pracy cytowanej powyżej, oraz były niezależne od stosowanego napięcia prądu podczas pomiaru przewodnictwa [Veenstra i DeHaan, 1986].

Złącza elektrotoniczne wykazano we wszystkich rodzajach komórek ustroju zwierzęcego i ludzkiego. Nie poznano jeszcze dokładnie charakterystyki fizjologicznej i fizycznej takich złącz. Wyniki dotychczasowych badań i pomiarów wskazują na dwie podstawowe cechy złącz elektonicznych, tj. spontaniczność ich wytwarzania i zanikania (otwarcie i zamknięcie) oraz brak oporności elektrycznej pozwalający na przepływ słabych prądów komórkowych wśród połączonych takimi złączami komórek. Te cechy złącz elektrotonicznych przyjęte zostały w tym opracowaniu za podstawę hipotezy o ich udziale w mechanizmie działania słabych pól e-m. Prądy związane z polami e-m mogą przepływać swobodnie w przestrzeniach międzykomórkowych cechujących się bardzo małą odpornością właściwą

(rzędu $2\Omega \cdot m$). W badaniach własnych i w niektórych publikacjach obcych stwierdzono wyraźniejsze zmiany badanych parametrów biologicznych (ilości jonów K^+ i Na^+ , przewodności, zakłóceń czynnościowych) pod wpływem słabych pól e-m (natężenia do kilkuset V/m) niż pod wpływem silnych pól e-m (natężenia do kilku tysięcy V/m). Według postawionej hipotezy słabe prądy w przestrzeniach międzykomórkowych powstające pod wpływem słabych pól e-m nie powodują istotnego przeciążenia złącz elektrotonicznych i mogą nawet oddziaływać na komórki poprzez te złącza. Natomiast silne prądy w przestrzeniach międzykomórkowych będące wynikiem działania silnych pól e-m stanowią przeciążenie złącz elektrotonicznych, które zamykając się uszczelniają błony komórkowe jako ekrany wysokoporowe i tym samym utrudnione zostaje działanie pól e-m na fizykochemiczne procesy wewnątrz komórek. Hipoteza ta nie jest sprzeczna z mechanizmem działania bardzo silnych pól e-m powodujących efekty termiczne, gdyż wówczas zostają przełamane wszelkie bariery ochronne na poziomie komórkowym i tkankowym oraz na poziomie ogólnoustrojowym. Hipoteza o udziale złącz elektrotonicznych w mechanizmie działania pól e-m na żywy ustrój jest częścią ogólniejszej hipotezy postawionej we wprowadzeniu do tego sprawozdania, do której powrócimy w części końcowej pracy.

15. POLA E-M WOLNOZMIENNE

Pola e-m wolnozmiennne obejmują przedział częstotliwości 3 – 300 Hz (tab. 1), chociaż w niektórych publikacjach ogranicza się go do 100 Hz. W praktyce chodzi więc głównie o pola e-m częstotliwości sieciowej (50 i 60 Hz) oraz o pola od kilku do kilkunastu Hz stosowane do celów leczniczych i o pola 25 – 75 Hz modulowane w funkcji częstotliwości wykorzystywane do celów łączności dalekosiężnej. Źródłem tych pól, które indukują w organizmie prądy elektryczne są prądy zmienne, wirowe lub pulsujące. Rozważane częstotliwości pól e-m pokrywają częstotliwości prądów zmiennych układów biologicznych mających zakres od ułamków Hz do około 1000 Hz. Na przykład w zapisie prądów czynnościowych ośrodkowego układu nerwowego w stanie fizjologicznym i w stanach patologicznych stwierdza się następujące fale: delta (δ) 0,5 – 4 Hz, theta (θ) 4 – 8 Hz, alfa (α) 8 – 13 Hz, beta (β) 13 – 22 Hz, gamma (γ) 22 – 30 Hz.

W dwóch bunkrach podziemnych, z których jeden nie był ekranowany przed naturalnym polem e-m o 10 Hz, a drugi był ekranowany płaszczem żelaznym powodującym osłabienie naturalnego pola e-m co najmniej o 40 dB, przeprowadzono badania biochemiczne i czynnościowe u 10 młodych zdrowych mężczyzn. Codzienne, przez wiele kolejnych dni pomiary ciepłoty ciała miały na celu ustalenie dokładnego czasu maksymalnej i minimalnej ciepłoty. W bunkrze ekranowanym stosowano w pewnych okresach sztuczne pole e-m o 10 Hz i fali prostokątnej o natężeniu 25 mV/m. Wahania dobowe ciepłoty ciała występowały co $25,1 \pm 0,66$ godz. w warunkach działania naturalnego i sztucznego pola e-m, natomiast w warunkach braku pola e-m wahania ciepłoty ciała występowały co $26,4 \pm 1,2$ godz. Ustalono w ten sposób, że po wyeliminowaniu pola e-m o częstotliwości 10 Hz okres wahań dobowych ciepłoty ciała uległ istotnemu wydłużeniu. Podobną desynchronizację

rytmiki dobowej stwierdzono w odniesieniu do wydalania elektrolitów w moczu badanych osób. Desynchronizacja rytmu pojawiała się bezpośrednio po wyeliminowaniu pola e-m oraz powracała synchronizacja normalna rytmu bezpośrednio po zadziałaniu sztucznego pola e-m 10 Hz [Waver, 1968]. Przeprowadzone badania metabolizmu u myszy trzymanyh w komorze Faradaya ekranującej pola e-m i u myszy poddanych działaniu pola 10 Hz wykazały u tych ostatnich obniżenie zużycia tlenu, zwiększenie ilości wody w tkankach i w całym organizmie (czego przyczyną było zmniejszone wydalanie moczu), spadek ilości hemoglobiny w krwinkach czerwonych. Niekorzystne następstwa u myszy na skutek ich trwałej izolacji w komorze Faradaya można było odwrócić przez zastosowanie pola e-m 10 Hz w postaci impulsów prostokątnych [Lang Siegnot, 1972]. U szczurów rosnących trzymanyh 4 godz. dziennie przez 50 dni w polu e-m 10 Hz o natężeniu 10 V/m (pole kondensatorowe o amplitudzie zmienianej sinusoidalnie) stwierdzono zwiększenie ilości wody w nerkach i w gruczole ślinowym podszczękowym oraz zwiększenie ilości Na^+ i K^+ oraz zmniejszenie ilości Ca^{++} w tym gruczole w porównaniu z wartościami tych zmiennych u szczurów kontrolnyh trzymanyh w komorze z blachy miedzianej [Mikołajczyk, 1984].

W serii badań na śluzowcu *Physarum polycephalum* uzyskano następujące wyniki: 1) wyraźne opóźnienie cyklu mitotycznego po długotrwałej ekspozycji (ponad 100 dni) w polu e-m 60 Hz lub 75 Hz o natężeniach 0,7 V/m i 0,2 mT, ale brak takiego opóźnienia w hodowli trzymanej przez 20 dni w polach o natężeniu 0,15 V i 0,04 mT; 2) opóźnienie o 0,5 – 2 godz. kolejnych podziałów mitotycznych śluzowca w hodowlach poddanych działaniu pola o 45, 60 lub 75 Hz i natężeniach 0,7 V/m i 0,2 mT w ciągu 14, 90 i 120 dni, a po 40 dniach od przzerwania stosowania pola częstość podziałów mitotycznych zrównała się z częstością podziałów hodowli kontrolnej; 3) opóźnienie cyklu mitotycznego śluzowców trzymanyh w wyżej wymienionych polach e-m wiązało się z obniżeniem zużycia tlenu o 16% w stosunku do zużycia tlenu przez śluzowce kontrolne; 4) u śluzowców poddanych działaniu fali ciągłej 75 Hz lub fali 75 Hz modulowanej częstotliwościowo w przedziale 72 – 80 Hz i o natężeniach 0,035 – 0,7 V plus 0,01 – 0,2 mT obserwowano wydłużenie cyklu mitotycznego i obniżenie tempa oddychania. Zmiany te w przedziale normalnej zmienności utrzymywały się stale podczas działania pola e-m. Stosowanie oddzielnie pola E lub pola H dawało podobne choć mniejsze efekty. Nie stwierdzono progowych natężeń powodujących opisane zmiany w przypadku łącznie działających pól E i H, natomiast w przypadku stosowanyh oddzielnie tych pól natężenia progowe do wywołania działania wynosiły 0,04 mT i 0,14 V/m [Goodman i współaut., 1976, 1979; Maroon i współaut., 1975, 1978].

W środowisku naturalnym człowiek podlega stale działaniu naturalnyh ELF pól e-m i pól e-m generowanyh wewnątrz własnego organizmu. Natężenie zmienne go pola e-m w atmosferze spada wraz z częstością od około 130 V/m prądu stałego (DC) do około 10^{-4} V/m w paśmie 1 Hz pola 60 Hz. Te bardzo małe natężenia naturalnyh pól e-m umożliwiają stosowanie pól ELF do radiokomunikacji z okrętami nawodnymi i podwodnymi. Z drugiej strony organizmy rozwijające się w tak słabym polu nie wykształciły naturalnyh mechanizmów ochronnyh przed zakłócającym działaniem pól ELF. W organizmie człowieka powstają sygnały w wyniku po-

budzenia nerwów i czynności innych komórek. Typowa komórka nerwowa ulega pobudzeniu pod wpływem czynnego potencjału 50 – 100 mV i wysyła impuls prądowy trwający około 0,4 ms; czas narastania takiego sygnału wynosi około 0,1 ms, a czas spadku sygnału około 0,5 ms. Po każdym impulsie występuje okres odnowy trwający 1 – 3 ms. Pola występujące na zewnątrz błony komórki nerwowej wynoszą maksymalnie około 5×10^{-2} V/m podczas czynnego potencjału komórki, gdy komórka otoczona jest płynem o względnie dużej przewodności rzędu 0,5 S/m. W odniesieniu do naturalnych pól e-m wewnątrzustrojowych można rozpatrywać dwa problemy [Barnes, 1986]: 1. Jak duży musi być zewnętrzny sygnał do zakłócenia przebiegu sygnału naturalnego wykorzystywanego do łączności lub kontroli procesów biologicznych. 2. Jaka część sygnału upływa z pobudzonych włókien nerwowych lub ich wiązek, stwarzając podstawowy szum w otaczających tkankach i zachodzących procesach. O wielkości natężenia takich szumów świadczy następujący przykład. Komórka rozrusznikowa (pacemaker cell) w zwoju brzuszny raka morskiego (*Aplysia*) wytwarza impulsy trwające 20 ms z częstotliwością powtarzania 1 Hz, mając potencjał spoczynkowy około -50 mV i rezystancję około $10^6 \Omega$ pomiędzy wnętrzem i otaczającym płynem. Jeśli przyjąć szerokość przedziału 100 Hz i $T = 300$ K, to napięcie szumu Johnsona (promieniowanie ciała czarnego) wyniesie $\bar{V}_n = 3 \times 10^{-6}$ V. Napięcie to daje stosunek potencjału spoczynkowego do $\bar{V}_n$ około 4×10^4 . Natężenie szczytowe prądu przepływającego w tych komórkach wynosi około 10^{-7} A i stąd oceniany prąd szumu $\bar{I}_n \approx 2 \times 10^{-12}$ A oraz stosunek prądu szczytowego do prądu szumu wynosi 2×10^4 . Przypuszcza się, że maksymalna wartość szumu jest taka sama jak dla szumu w węźle Ranviera nerwu żaby i stąd dla pasma 1 Hz $\bar{V}_n = 1,4 \times 10^{-5}$ V dla środkowej częstotliwości 1 Hz w odniesieniu do potencjału spoczynkowego -50 mV. Wartość ta jest około 10^3 razy większa od szumu Johnsona. Prawdopodobnie stosunek $\frac{1}{f}$ jest największym źródłem szumu przy błonach komórkowych dla częstotliwości poniżej 160 Hz [Verveen i Derksen, 1968].

W pomiarach EEG pomiędzy elektrodami umieszczonymi w odstępach 5 cm napięcie szczyt-szczyt wynosi około 30 μ V. Napięcie to jest całką zsumowania wektora rozproszonych pól z pobudzonych komórek nerwowych w mózgowiu występujące pomiędzy dwoma elektrodami rejestrującymi [Barnes, 1986]. Ponieważ pobudzonych jest bardzo dużo komórek, to większość sygnałów o wartości 50 mV z oddzielnych komórek znosi się w wyniku sumowania tych potencjałów z wielu podobnych komórek pobudzonych w rozmaitych czasach oraz przez tłumienie powodowane rozchodzeniem się pola przez tkanki miękkie. Oceniony potencjał powierzchniowy wzdłuż włókna nerwowego wynosi 3×10^{-4} V/m do 5×10^{-2} V/m, a odpowiednia gęstość prądu na zewnątrz komórek nerwowych 5×10^{-2} A/m² do 4 A/m². Napięcia w zapisie EEG wykazują wyraźne okresowe składowe (zwłaszcza w czasie snu) około 10 Hz zwane falami α . Szczytowa amplituda fal alpha wynosi do 50 μ V podczas pomiaru na skórze głowy. Fala R w zapisie EEG może mieć amplitudę napięcia do 2,5 mV, w warunkach przeciętnych 0,5 – 1,5 mV, zależnie od umieszczenia elektrod, ilości tłuszczu w tkankach ciała i innych parametrów ciała. Częstotliwość skurczów serca wynosi zazwyczaj 1 – 2 Hz, a czas trwania zespołu "QRS" w typowym zapisie EKG około 40 ms. Sygnał mierzony na powierzchni skóry jest wypadkową rozpraszania

energii e-m z czynnych elektrycznych komórek serca znajdujących się w określonej odległości od miejsca pomiaru. Szacowana gęstość prądu w pobliżu pobudzonych komórek serca wynosi około 1 A/m^2 .

Większa część natężenia pól e-m w środowisku pochodzi z rozpraszania energii e-m generowanej przez system zasilania w energię elektryczną. W typowym podmiejskim domu podstawowe natężenie pola E częstości 60 Hz wynosi $1 - 20 \text{ V/m}$ i może być znacznie wyższe w pobliżu rozmaitych urządzeń domowych i dochodzić do 200 V/m . W odległości $2,5 - 10 \text{ cm}$ pomiędzy ciałem człowieka i kablem elektrycznym natężenie pola E wynosi $150 - 500 \text{ V/m}$ [Barnes, 1986].

Ocena wielkości pól e-m wewnątrz ciała człowieka, pochodzących z zewnętrznych pól e-m, zależy od geometrii i właściwości elektrycznych ciała. Szczegółowe oceny wykazują tak dużą zmienność osobniczą, że niezbędne są obliczenia komputerowe dla uzyskania dokładnych danych. Jednakże w wielu przypadkach można zastosować współczynnik 10^{-6} do przybliżonego przeliczania zewnętrznego pola E 60 Hz w wolnej przestrzeni na natężenie powstające w tkance. Indukowane prądy w kończynach dolnych wynoszą typowo $15 \mu\text{A/kV/m}$ wartości pola zewnętrznego [Barnes, 1986]. Pewne doświadczenia wskazują na nieliniową zależność natężenia pola E 60 Hz w powodowaniu efektów biologicznych. Szczury poddane działaniu pola 60 Hz wykazały zwiększenie sterydogennej czynności kory nadnerczy po ACTH pod wpływem pola o natężeniu 10 kV/m i czasie działania $7 - 9 \text{ godz.}$, wyzwalającego pole wewnętrzne w organizmie szczura o natężeniu $1,7 \times 10^{-4} \text{ V/m}$. Nie uzyskano podobnego efektu pod wpływem pola o natężeniu $5, 100$ lub 1000 kV/m [Berkowitz i Barnes, 1979]. Słabe pole elektryczne $3 \times 10^{-2} \text{ V/m}$ indukowane przez pulsujące pole magnetyczne 500 Hz zwiększało o 27% uwalnianie H-noradrenaliny z klonowanych komórek nerwowych [Dixey i Reins, 1982].

16. POLA E-M SZYBKOZMIENNE

Pola e-m szybkozmiennne obejmują częstotliwości zakresów powyżej 300 Hz . Źródłem takich fal są liczne urządzenia grzejnictwa termoelektrycznego, łączności, radiolokacji i lecznictwa. Wiele urządzeń tego typu jest źródłem bardzo silnych pól e-m o szkodliwym oddziaływaniu na człowieka i inne obiekty biologiczne. Pola takie cechują się następującymi ogólnymi parametrami technicznymi: 1) zwykłą sinusoidalną zmiennością harmoniczną, co odnosi się w głównej mierze do urządzeń termoelektrycznych; 2) dużą rozpiętością wartości natężenia pola E — od ułamka V/m do tysięcy V/m — i pola H — od pojedynczych $\mu\text{A/m}$ do tysięcy A/m — oraz gęstości strumienia energii — od $\mu\text{W/m}^2$ do setek W/m^2 ; 3) zamierzoną i przypadkową modulacją częstotliwości, amplitudy lub impulsową; 4) szerokim widmem częstotliwości. Pola te zakłócają czynności układów biologicznych, a w przypadku dużych wartości natężeń lub gęstości strumienia energii powodują efekty termiczne prowadzące do nieodwracalnych uszkodzeń i śmierci z przegrzania. Pola e-m zaliczane do pól małej częstotliwości nawet o słabych natężeniach mogą spełniać rolę bodźców biologicznych ze względu na przenikalność i długodystansową propagację. Na przykład w przypadku pola 10 kHz

o natężeniu 100 mV/m dom z cegły przepuszcza około 95% energii, komora Faradeya z 1 mm drutu o oczkach 30 mm przepuszcza — około 65% energii i dopiero bunkier atomowy z 60 cm twardej warstwy żelbetonowej — mniej niż 1% energii tego pasma częstotliwości. Wyładowania o 10 kHz i amplitudzie 1 V/m wytwarzają w tkankach pole o gęstości prądu 10^{-8} - 10^{-9} A/cm², który może wywierać pobudzające działanie na nerwy obwodowe. Fale zakresu 10 — 100 kHz mogą spełniać rolę fal nośnych dla fal o mniejszej częstotliwości [Persinger i współaut., 1973].

W zastosowaniach przemysłowych i ogólnych wykorzystuje się coraz więcej urządzeń, które są źródłem pól e-m małych częstości. Pola tego typu cechują się następującymi ogólnymi parametrami technicznymi: 1) zwykłą sinusoidalną zmiennością harmoniczną, co odnosi się w głównej mierze do urządzeń elektroenergetycznych; 2) dużą rozpiętością wartości natężenia pola E — od ułamka V/m do tysięcy V/m — i pola H — od pojedynczych μ A/m do tysięcy A/m; 3) zamierzoną i przypadkową modulacją częstotliwości, amplitudy lub impulsową oraz transformacją do wyższych harmoniczných; 4) szerokim spektrum częstości.

W 1960 r. wprowadzono do lecznictwa tzw. prądy interferencyjne [Nemec, 1960], polegające na jednoczesnym oddziaływaniu na tkanki dwóch prądów sinusoidalnych, z których jeden ma częstość około 4 kHz, a częstość drugiego różni się o 1 — 100 Hz. Dotychczas nie było dostatecznie przekonującej interpretacji sposobu działania takich prądów. W istocie chodzi o nałożenie się obu prądów w tkankach, czyli zjawisko określonej modulacji amplitudy w funkcji czasu i przestrzeni. Modulacja przestrzenna polega na zmianie orientacji przestrzennej eliptycznej polaryzacji prądu, co umożliwia różnokierunkowe działanie prądów na tkanki [Sidorcuk, 1984]. Efekt leczniczy prądów interferencyjnych polega przede wszystkim na działaniu przeciwbólowym w obrębie obwodowego układu nerwowego, ale mechanizm tego działania może dotyczyć także elementów nerwowych na różnych poziomach ośrodkowego układu nerwowego. W istocie chodzi o "zakłócenia" przepływu bodźców powodujących wrażenia bólowe. Taki mechanizm działania prądów interferencyjnych 4 kHz pozwala przypuszczać, że podobnie działają prądy zmienne tego przedziału częstości pochodzące ze źródeł przemysłowych. Należy dodać, że w piśmiennictwie polskim opisano szybkie i bardzo korzystne wyniki leczenia z zastosowaniem prądów interferencyjnych w zespołach bólowych nerwów obwodowych [Kwasucki i Szczudlik, 1984]. Należy zdawać sobie sprawę z tego, że w przypadku długotrwałego narażenia na pola e-m podobnego przedziału częstości (1 — 10 kHz) ze źródeł przemysłowych nie może być "korzystnego działania" na pracowników takich pól ze względu na kilkugodzinną niekontrolowaną ekspozycję codziennie w ciągu tygodni, miesięcy i lat. Taka ekspozycja może doprowadzić do zaburzeń czynnościowych w układzie nerwowym i pośrednio w innych narządach.

W 1964 r. opisane zostały pomiary pól e-m w otoczeniu nagrzewnic indukcyjnych generujących pole e-m 60 — 90 kHz, a u pracowników zatrudnionych przy tych nagrzewnicach przeprowadzono badania lekarskie. Na stanowiskach pracy natężenie pola E wynosiło 5 — 106 V/m, a natężenie pola H 0,2 — 95 A/m, natomiast w odległości 60 cm od induktora stwierdzono natężenie 5,1 — 25 V/m pola E i 0,2 — 10 A/m

pola H. U zbadanych 30 mężczyzn i 13 kobiet stwierdzono zaburzenia naczynioruchowe (dermografizm, sinicę dystalnych paliczków palców z obniżeniem ciepłoty i nadmierną potliwością), asymetrię ciśnienia tętniczego, dodatni odruch ortostatyczny polegający na zwiększeniu częstości tętna o 24 – 30 uderzeń na minutę po przyjęciu pozycji stojącej oraz skłonność do hipotonii. Stwierdzono także cechy tachykardii, bradykardii i arytmii zatokowej, zaburzenia przewodnictwa wewnątrzkomorowego i zmiany załamka T w zapisie EKG. Ujawniono również leukocytozę i monocytozę we krwi pracowników ze stażem pracy powyżej 5 lat. Ze względu na stwierdzone zmiany patologiczne u pracowników polecono ekranowanie induktorów, co doprowadziło do ograniczenia natężenia pola E do 5 – 10 V/m i pola H do 2 A/m. Takie wartości pola E i H zaproponowano jako dopuszczalne w odniesieniu do pól e-m przedziału 60 – 90 kHz [Szmurwa i współaut., 1964].

W otoczeniu urządzeń do indukcyjnego wprowadzania mieszaniny utwardzającej do innych wyrobów metalowych (lemiesz) pracownicy podlegali złożonej ekspozycji na czynniki toksyczne i na pole e-m 60 kHz o natężeniu 80 V/m pola E. Pracowników zatrudnionych w takich warunkach narażenia badano pod kątem zmian po działaniu czynników toksycznych, natomiast nie uwzględniono skutków działania pola e-m. W opisanych warunkach narażenia zawodowego trudno ustalić czyste efekty pola e-m [Marczenko i Broitman, 1977]. W 1973 r. podjęto jako jedno z pierwszych badanie doświadczalne nad wpływem pola e-m 26 kHz na układy biologiczne, gdyż jak podaje autor badania, prądy takiej częstości znajdują zastosowanie w grzejnictwie indukcyjnym i w łączności radiowej, natomiast nie było do owego czasu danych o działaniu biologicznym pola e-m tego typu prądów [Zervins, 1973]. W opisanych doświadczeniach oceniono działanie pola e-m 26 kHz o gęstości strumienia 160 G (= 16 mT = 1280 A/m) składowej magnetycznej na rozwój zarodków kurcząt. Nie zanotowano ujemnego wpływu tego pola o zastosowanych parametrach na wylęganie jaj oraz na rozwój i proporcję płci wylęgniętych kurcząt. Przy omawianiu tych wyników podkreślono jednakże, że były to tylko obserwacje makroskopowe, natomiast nie badano potencjalnych zmian na poziomie molekularnym, zwłaszcza w układzie nerwowym.

Na działanie pola e-m omawianego przedziału częstości na poziomie molekularnym wskazują inne badania biologiczne. Do badań zastosowano pole 7kHz modulowane impulsowo o czasie trwania impulsu 1,3 ms, z przerwą 10 s pomiędzy kolejnymi impulsami, oraz stosowano natężenie 20 i 72 kA/m. Na takie pola ekspozowano szczury 15-krotnie oraz w sposób przewlekły przez 1,5, 3 i 6 miesięcy. W wątrobie narażonych zwierząt stwierdzono rozkojarzenie w 39,8% procesów utleniania i fosforyzacji oraz związany z tym spadek o 64,7% ilości wysokoenergetycznego ATP, natomiast wzrost niskoenergetycznych związków ADP o 156% i AMP o 120%. Jednocześnie stwierdzono zmniejszenie o 37,4% ilości glikogenu w wątrobie oraz zwiększenie o 60% ilości kwasu mlekowego i o 28,3% ilości kwasu pirogronowego. Stwierdzono także istotne zaburzenia w przemianie związków azotowych, a mianowicie zmniejszenie o 16,3% aktywności aldehydo-dezaminazy i wyrównawcze zwiększenie o 24,6% grup aminowych zawartych w glutationie, zmniejszenie o 23,7% ilości amoniaku i o 11,2% azotu pozabiałkowego. Te zaburzenia przemiany węglowodanowo-energetycznej i azotowej świadczą o zmianach

strukturalnych w komórkach wątroby [Jewtuszenko i współaut., 1972a,b; Kołodub i Jewtuszenko, 1974]. Przeprowadzono interesujące badania nad tempem wzrastania 120 małych szczurów w wieku 18, 45 i 65 dni, co odpowiadało w odniesieniu do człowieka wiekowi 4,1, 7,24 i 10,37 lat. Zwierzęta poddawano działaniu przez 15 – 20 dób pola o częstotliwości zmienianej płynnie w przedziale 12 kHz – 6 MHz o natężeniu 5 V/m (chodziło o przemiatanie pola w określonym przedziale częstotliwości). W wyniku takiego narażenia stwierdzono istotne zwolnienie tempa wzrastania zwierząt, przy czym maksymalna różnica ciężaru zwierząt narażonych i kontrolnych wynosiła 220%. To hamujące działanie na wzrost było tym większe, im wcześniej po urodzeniu rozpoczęto narażanie zwierząt. Hamujący efekt na tempo wzrastania pod wpływem płynnie przemiatanego pola e-m był coraz mniejszy wraz ze zwiększeniem częstotliwości pola do 200 kHz, po czym dla jeszcze większych częstotliwości obserwowano efekt odwrotny. Stwierdzono też zmiany w zachowaniu zwierząt, polegające na zmniejszaniu się agresywności po kilkakrotnym narażeniu. Działanie przemiatanego pola e-m nie spowodowało wykrywalnych zmian we krwi badanych zwierząt. Niezwykle ważną obserwacją było stwierdzenie wyraźnego hamowania wzrostu bardzo złośliwego raka reticulosarcoma pod wpływem stosowanych pól e-m. W odniesieniu do tego efektu zauważono osłabienie wpływu pola e-m o częstotliwościach powyżej 20 kHz. Wyniki badań zostały potwierdzone wyraźnym hamowaniem rozwoju i obumieraniem zarodków szczurów po narażeniu samic ciężarnych na przemiatanie pola e-m omawianej częstotliwości. Z badań wynioskowano, że fluktuacyjne pola e-m małej częstotliwości i o widmowym rozkładzie energii wywierają uniwersalny hamujący wpływ na procesy normalnego i nieprawidłowego wzrostu. Uznano zatem za możliwe wykorzystanie takich wysokoentropijnych pól e-m do leczenia nowotworów [Jurijew i Krasnogorskaja, 1980].

Analiza z zastosowaniem transformacji Fouriera prostokątnych impulsów pola elektrycznego stosowanych najczęściej do modulacji funkcjonowania komórek i tkanek wykazała, że najbardziej czynną formą pola E są "paczki" (burst) impulsów o ściśle określonych w czasie załamkach o określonych wartościach amplitudy. Optymalny czas trwania załamek impulsu wynosi $200\text{ us} + 20\text{ us} + 8\text{ us} = 228\text{ us}$, niezależnie od kształtu załamek (prostokątne, sinusoidalne lub inne) o harmonicznym powtarzaniu iglic wynoszącym wielokrotność 4,4 kHz. Na podstawie podanych badań zapowiedziano, że stanowią one początkowy etap na drodze do ustalenia standardu w sprawie ilościowej zależności energii e-m oraz typu komórek i ich patologii [Billa i Kaufman, 1984].

U zarodków kurcząt poddanych w ciągu pierwszych 48 godz. rozwoju działaniu sinusoidalnego zmiennego pola H 1, 10 i 100 kHz o natężeniach 0,1, 1, 10 i 100 A/m wykazano istotnie większą częstość anomalii rozwojowych pod wpływem częstotliwości przedziału 16,7 – 100 kHz. Progowe natężenie pola H do wywołania tego typu zmian wynosiło 0,1 – 1 A/m i odsetek powstających anomalii rozwojowych był niezależny od natężenia pola powyżej podanych wartości progowych natężenia [Juutilainen i Saali, 1986]. W pracy przeglądowej [Stuchly, 1986] przytoczono wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w otoczeniu masztów nadawczych i w innych miejscach stacji radiokomunikacyjnych pracujących na częstotliwościach 10 – 100 kHz.

W otoczeniu masztów indukcja wynosiła 0,3 – 33,3 μT (0,024 – 2,664 A/m), a w pomieszczeniach stacji 0,13 – 13,7 μT (0,01 – 1,1 A/m). Nie przytoczono mocy analizowanych 4 stacji radionadawczych, ale podane wartości indukcji magnetycznej świadczą o tym, że moc tych stacji wynosiła kilkadziesiąt kW.

17. PODSTAWY DZIAŁANIA BIOLOGICZNEGO PÓŁ E-M MAŁEJ CZĘSTOŚCI

Pola e-m małej częstotliwości mogą spełniać rolę bodźców biologicznych ze względu na przenikalność i długodystansową propagację. W przypadku pola 10 kHz o natężeniu 100 mV/m z cegły przepuszcza około 95% energii, klatka Faradaya z 1 mm drutu o oczkach 30 mm – około 65% energii i dopiero bunkier atomowy z 60 cm twardej warstwy żelbetonowej – mniej niż 1% energii tego pasma częstotliwości [Perrins i współaut., 1973]. Według tych samych autorów wyładowania o częstotliwości 10^4 Hz i amplitudzie 1 V/m wytwarzają w tkankach pole o gęstości prądu 10^{-8} – 10^{-9} A/cm², które może wywierać pobudzające działanie na receptory. Fale zakresu 10 – 100 kHz występują powszechnie w środowisku ziemskim i mogą spełniać rolę fal nośnych dla fal e-m o jeszcze mniejszej częstotliwości. Znaczna długość tych fal umożliwia przenikanie do obiektów mieszkalnych i przemysłowych. Podobną rolę mogą spełniać pola e-m tego przedziału częstotliwości pochodzące ze źródeł sztucznych, z tym że ich działanie może powodować niepożądane skutki w organizmach żywych.

W ośrodkach biologicznych, w tym również w organizmie człowieka kondukcyjność tkanek wykazuje dużą niejednorodność dla pól e-m małych częstotliwości, co jest zależne od układu włókien mięśniowych i nerwowych. W obszarach obwodowych (powierzchniowych) organizmu człowieka przeważa oddziaływanie składowej magnetycznej tego typu pól e-m i ta składowa decyduje o indukowanej gęstości prądu w tkankach. W korze mózgowej większość włókien nerwowych ma układ równoległy i kierunek pionowy. Taka struktura przestrzenna włókien sprawia, że przepływ indukowanego prądu jest prostopadły do ich kierunku. Jednak ze względu na silne pofałdowania kory mózgowej część indukowanego prądu przepływa wzdłuż włókien nerwowych, co ma niekorzystne znaczenie dla przepływu naturalnych impulsów nerwowych. Dla częstotliwości powyżej 30 kHz występuje ryzyko efektu cieplnego obok efektu zakłóceniewego, przy czym graniczne wielkości składowej magnetycznej B i składowej elektrycznej E dla wywołania efektu cieplnego wynikają z zależności

$$\tilde{B}_0 = \frac{10}{f} T \quad \tilde{E}_0 = \frac{5 \times 10^{-11}}{f} \text{ V/m.}$$

Zależności te są spełnione w przedziale częstotliwości od 30 kHz do 30 MHz [Bernhardt, 1979].

Elektryczna czynność serca i mózgowia człowieka wywołuje przepływ prądu o mierzalnej gęstości w całym ciele człowieka. Obliczenia poparte pomiarami wykazały, że pola e-m zakresu 10^3 – 10^4 Hz wywołujące w tkankach gęstości prądu rzędu 10 – 100 $\mu\text{A/cm}^2$ mogą wywierać niekorzystny wpływ na procesy fizjologiczne ustroju. Na tej podstawie przez wprowadzenie współczynnika bezpieczeństwa "10"

określono jako dolną dopuszczalną wartość graniczną około $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dla pola o 10^3 Hz; ta wartość zwiększa się stopniowo wraz z częstotliwością pola, osiągając wielkość $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ dla częstotliwości 30 MHz. Dla obliczenia tych granicznych progowych wartości gęstości prądu w zależności od natężenia i częstotliwości zewnętrznego pola zaproponowano następujące wyrażenia obowiązujące w przedziale 1 Hz – 30 MHz

$$\tilde{B}_0 = 10^{-4} f^{-1/5} \text{ T} \quad \tilde{E}_0 = 5 \times 10^5 f^{-1/5} \text{ V/m.}$$

Natężenia zewnętrznego pola leżące w przedziale wartości progowych i granicznych, tj. powodujących efekty cieplne, mogą z pewnym prawdopodobieństwem wywierać bezpośredni wpływ na komórki nerwowe i mięśniowe, natężenia zaś zewnętrznych pól e-m o wielkościach poniżej wielkości progowych nie powinny wywierać bezpośredniego wpływu na te elementy biologiczne. Te dane liczbowe odnoszą się do struktur komórkowych, nie uwzględniono natomiast tutaj możliwości oddziaływania pól e-m na poziomie supramolekularnym i molekularnym. Na tych poziomach wchodzi w grę inne mechanizmy oddziaływania i nie jest wykluczony niekorzystny wpływ pól e-m o znacznie mniejszych wielkościach niż wielkości podane w powyższych obliczeniach [Bernhardt, 1973]. Niektóre z omówionych wyników badań doświadczalnych dotyczących zaburzenia przemiany węglowodanowo-energetycznej w wątrobie zwierząt poddanych działaniu pól e-m 7 kHz są potwierdzeniem realności takich mechanizmów działania biologicznego pól e-m przedziału 1 – 100 kHz.

Inny mechanizm działania pól e-m małej i średniej częstotliwości polega na pobudzeniu elementów wrażliwych na odkształcenia i wykazujących właściwości piezoelektryczne. Wykazano doświadczalnie na ptakach, że ich pióra wykazują rezonans piezoelektryczny w paśmie 1 – 10 kHz pod wpływem zewnętrznego pola e-m [Bigu-Del-Blanco i Romerrio-Sierra, 1975]. Należy podkreślić, że w organizmie człowieka cały kościec wykazuje właściwości piezoelektryczne i stąd cały układ kostny może reagować na działanie pól e-m omawianego przedziału częstotliwości.

18. ZMIANY PATOLOGICZNE U PRACOWNIKÓW NARAŻONYCH NA POLA E-M W PRACY ZAWODOWEJ

[Dotychczas nie scharakteryzowano swoistego zespołu zmian powstających pod wpływem pól e-m, pomimo rozmaitych propozycji w tym przedmiocie. Wynika to prawdopodobnie w dużej mierze z tego, że w ustroju człowieka nie udało się zidentyfikować swoistych receptorów energii e-m, która według realnych faktów pochłaniana jest przez wszystkie tkanki organizmu. Ustalono bezspornie, że niektóre tkanki i narządy są bardziej wrażliwe na działanie energii e-m, ale to wynika z naturalnych właściwości tych narządów bądź z ich naturalnych procesów fizjologicznych. Do narządów cechujących się dużą wrażliwością na działanie energii e-m zalicza się: części przeziernie oka, a zwłaszcza soczewkę; gonady męskie; układ krwiotwórczy; nabłonek jeliła cienkiego; ośrodkowy układ nerwowy; układ hormonalny; serce. W pierwszych czterech wymienionych narządach

i układach odbywają się ustawicznie podziały i różnicowanie komórek, które w tych stadiach są bardzo podatne na działanie energii e-m; poza tym istotne znaczenie ma łatwość zaburzeń funkcji pod wpływem względnie niewielkich przyrostów temperatury, czemu sprzyja brak naczyń krwionośnych (soczewka) lub ograniczone możliwości oddawania ciepła drogą naczyń krwionośnych (gonady). Z kolei w układzie nerwowym i w sercu zachodzą ustawicznie przebiegi elektryczne określonej częstości i modulacji, które mogą być podatne na zakłócenia pod wpływem zewnątrz-pochodnej energii e-m. Odnosi się to szczególnie do wyspecjalizowanych obszarów i ośrodków w mózgowiu (jądra i zgrupowania komórek rozrusznikowych, obszary neurosekrecyjne) i w sercu (centra automatyzmu serca). Układ hormonalny można porównać do wzmacniacza biologicznego, gdyż począwszy od tworów siatkowatego (formatio reticularis) i ośrodków podwzgórza poprzez przysadkę do gruczołów obwodowych, następuje stopniowe zwiększenie ilościowe wydzielania substancji czynnych biologicznie, przy czym hormony gruczołów obwodowych wpływają na wyższe piętra układu na zasadzie sprzężenia zwrotnego. Jest to więc układ integrujący i regulacyjny, którego najczulszymi ośrodkami są podwzgórze i przysadka, gdzie występuje powiązanie z ośrodkowym układem nerwowym. Ośrodki styczne ośrodkowego układu nerwowego z układem hormonalnym należą do najczulszych ośrodków na działanie energii e-m. Na szczęście układ hormonalny, zwłaszcza przysadka jako gruczoł nadrzędny, wykazuje dużą rezerwę czynnościową i dlatego stosunkowo trudno powstają tam ewidentne zaburzenia pod wpływem pól e-m. Tym niemniej w większości opisanych zmian klinicznych pod wpływem narażenia na pola e-m podano objawy świadczące o udziale wyższych pięter układu hormonalnego [Mikołajczyk, 1972, 1974a,b].

Retrospektywna ocena opisów zmian patologicznych pod wpływem narażenia zawodowego na pola e-m wskazuje na stosunkowo najbogatsze materiały faktograficzne w piśmiennictwie radzieckim. Na podstawie szeroko zakrojonych badań higienicznych i lekarskich podano klasyfikację zespołów spowodowanych narażeniem na pola mikrofalowe [Drogiczina i Sadczikowa, 1965]. W kilka lat później przedstawiano [Tiagin, 1971] bardziej zwięzłą charakterystykę zespołów występujących u osób narażonych na pola mikrofalowe zależnie od przewagi objawów (tab. 9). W piśmiennictwie polskim podjęto próbę scharakteryzowania tzw. choroby mikrofalowej [Zerski i współaut., 1964], a następnie opisano "postać nerwową choroby mikrofalowej" charakteryzującą się triadą objawów, tj. subiektywnymi objawami nerwicowymi, wzmoczoną pobudliwością wegetatywną i zmianami czynności bioelektrycznej mózgowia (EEG) [Mielczarek, 1971]. Przedstawione zespoły kliniczne nie uzyskały ogólnej akceptacji w piśmiennictwie światowym, mimo iż opisywane są nieswoiste zmiany o charakterze psychonerwicowym przypominające niektóre z podanych wyżej zespołów. I tak na przykład zwrócono uwagę, że objawy chorobowe u mężczyzny po 3 latach jego pracy przy naprawie radarów przypominały objawy zespołów opisanych przez autorów radzieckich: znaczny spadek ciężaru ciała, zaburzenia neurowegetatywne, nadmierna krzepliwość krwi i niedoczynność przysadki. Objawy te ustąpiły po zmianie miejsca pracy przez wymienionego mężczyznę [Servantie, 1978]. Większość wyników badań lekarskich wśród mniej lub bardziej licznych grup osób narażonych na pola e-m zwraca uwagę na rozmaite

zaburzenia hormonalne. Takie zmiany świadczą o reagowaniu układu hormonalnego na pola e-m. Potwierdzeniem tego wpływu są udokumentowane zmiany hormonalne u osób narażonych na pola e-m.

T a b e l a 9

Rodzaje zespołów chorobowych
u pracowników narażonych na promieniowanie mikrofalowe
[według autorów radzieckich]

Lp.	Wyszczególnienie
A. Podział zaproponowany przez Drogiczinę i Sadczikową w 1964/1965 r.	
1	Zespół wegetatywny. Reakcje ze strony układu sercowo-naczyniowego spowodowane przewagą wpływów nerwu błędnego, tj. zwolnienie akcji serca, obniżenie ciśnienia krwi. Wzmożenie czynności tarczycy. Zmiany ilości histaminy i frakcji białek w surowicy krwi
2	Zespół asteniczny. Przewaga "odczynów nieswoistych" w postaci osłabienia, obniżenia ciśnienia krwi i zwolnienia akcji serca. Powiększenie tarczycy. Zmiany liczbowe erytrocytów i leukocytów we krwi obwodowej. Zwiększenie ilości histaminy we krwi
3	Zespół asteniczno-wegetatywny. Zmiany naczynioskurczowe. Obniżenie ciśnienia krwi i zwolnienie akcji serca. Zwężenie naczyń krwionośnych na dnie oka. Zmiany czynności serca w zapisie EKG. Zaburzenia czynności tarczycy. Osłabienie potencji płciowej. Zmniejszenie zdolności do pracy
4	Zespół angiodystoniczny (zmiennego napięcia ścian naczyń krwionośnych). Niestaołość emocjonalna, osłabienie pamięci i uwagi. Niestaołość tętna i ciśnienia krwi. Skłonność do obniżonego ciśnienia krwi. Zmiany czynności serca w zapisie EKG i zmiany czynności mózgowia w zapisie EEG. Przesunięcia liczbowe leukocytów we krwi obwodowej
5	Zespół międzymózgowy. Różne zaburzenia ze strony przewodu pokarmowego. Wyraźne zaburzenia w czynności układu sercowo-naczyniowego. Załamywanie się funkcji rozmaitych narządów. Silnie zaznaczone objawy zaburzeń nerwowych. Zespół ten występuje w przypadku dużego narażenia na nadmierne gęstości strumienia energii mikrofalowej
B. Podział zaproponowany przez Tiagina w 1971 r.	
1	Zespół asteniczny. Osłabienie, drżenie rąk, ośpienie, obniżenie napięcia emocjonalnego. Chwiejność układu nerwowego wegetatywnego. Zasinienia obwodowych części ciała, np. palców; nadmierna potliwość; wzmożenie odruchów ze strony mięśni przywłosowych; zmiany dermografizmu; niestabilność tętna i ciśnienia tętniczego. Wszystkie te zmiany są odwracalne i mogą być leczone ambulatoryjnie
2	Dystonia wegetatywno-naczyniowa (nerwowo-krążeniowa). Znaczne wahania częstości tętna i ciśnienia tętniczego krwi. Zwolnienie, a niekiedy przyspieszenie akcji serca. Obniżenie ciśnienia krwi. Zmiany czynności serca w zapisie EKG. Zmiany histologiczne i czynnościowe w naczyniach krwionośnych włosowatych



Lp.	Wyszczególnienie
-----	------------------

- | | |
|---|--|
| 3 | Zespół międzymózgowy (mikromiędzymózgowy). Złożone i o różnym nasileniu dysfunkcje ze strony przewodu pokarmowego. Silne zaburzenia sercowo-naczyniowe. Nadmierna senność. Zmniejszenie aktywności ruchowej. Jawna lub utajona niedoczynność układu hormonalnego (w osi podwzgórze – przysadka – nadnercza). Osłabienie potencji płciowej. Zespół ten wymaga leczenia szpitalnego i nie wszystkie objawy cofają się |
|---|--|

Po okresie opublikowania powyższych klasyfikacji zmian powstających w wyniku narażenia na energię mikrofalową trudno było porównywać wyniki aktualnie prowadzonych badań z wymienionymi zespołami, gdyż z pewnością nie było już tak dużych narażeń na mikrofałę z powodu wprowadzenia bardziej rygorystycznych przepisów sanitarnych. Tym niemniej przedstawione klasyfikacje powstały w wyniku badania licznych populacji narażonych na pola mikrofalowe i są dobitnym świadectwem szkodliwego działania tych pól oraz nakazują daleko idącą ostrożność w podejmowaniu decyzji w sprawie dopuszczalnych natężeń nie tylko pól e-m zakresu mikrofalowego, ale także pól e-m niższych przedziałów częstości. Przestrogi wynikające z powyższych badań nie są dostatecznie brane pod uwagę w normowaniu dopuszczalnych natężeń pól e-m małej i bardzo małej częstotliwości, w których to przedziałach nadmiernie liberalizuje się NDN, chociaż nie ma na to dowodów poza wynikami obliczeń teoretycznych.

Zbadano stan czynności tarczycy i układu przysadka – nadnercza u 35 ludzi narażonych chronicznie (25 – 40 lat) na działanie mikrofal, których gęstość strumienia energii na stanowiskach pracy nie przekraczała $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. U badanych osób nie stwierdzono powiększenia tarczycy, ale u 3 stwierdzono zwiększenie podstawowej przemiany materii o 25 – 30%, u 4 o 18 – 20% oraz spadek u 1 osoby. U osób z podwyższoną przemianą materii stwierdzono zwiększone wychwytywanie jodu radioaktywnego przez tarczycę. U osób narażonych stwierdzono obniżenie kortykosterydów we krwi, których ilość uległa zwiększeniu o 9,6 – 17,08% po podaniu ACTH, po czym również spadek o 50% eozynofiliów. Zdaniem autorów tej pracy dobra reakcja kory nadnerczy na podany ACTH świadczyła o tym, że chroniczne działanie mikrofal powodowało zaburzenia czynnościowe nie nadnerczy, ale przysadki, które powstają w następstwie uszkodzenia wyższych regulacyjnych ośrodków nerwowych [Kolesnik i współaut., 1967]. W innym doniesieniu [Diaczenko, 1970] opisano wyniki badań czynności tarczycy u 38 mężczyzn w wieku 24 – 39 lat o stażu pracy przy urządzeniach mikrofalowych (pasmo centymetrowe) 3 – 15 lat. U 18 stwierdzono zespół asteniczno-nerwicowy oraz zwiększenie o 15% wychwytywania ^{131}J przez tarczycę po 2–4 godz. Nie stwierdzono natomiast zmian ilościowych PPM (podstawowej przemiany materii). Obecność zaburzeń nerwicowych i czynności tarczycy u badanych osób autor przypisuje zaburzeniom procesów nerwowych i procesów regulacji międzymózgowej (diencephalon). Polscy autorzy [Denisiewicz

i współaut., 1970] ocenili czynność tarczycy u 142 mężczyzn obsługujących urządzenia mikrofalowe. Na stanowiskach pracy gęstość strumienia energii wynosiła od 10 do 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Badania kliniczne i czynnościowe tarczycy (T-24 i $^{131}\text{J}-\text{T}_3$) nie wykazały w zasadzie zaburzeń czynności tarczycy. Istotną różnicę pomiędzy średnimi wartościami T-24 i PPM u osób narażonych na mikrofałę i u osób kontrolnych autorzy tłumaczyli wpływem czynników pozatarczycowych, a mianowicie nadmierną pobudliwością ośrodkowego układu nerwowego. U osób narażonych na mikrofałę stwierdzono bowiem zaburzenia neurowegetatywne w 61 – 72%, a poza tym u niektórych zaburzenia potencji płciowej. Dostępnym dokładnym badaniem lekarskim u 45-letniego mężczyzny zatrudnionego przez szereg lat przy obsłudze radarów (bez podania wartości gęstości strumienia energii) wykazały znaczne obniżenie wychwytywania jodu po pobudzeniu tarczycy hormonem tyreotropowym (TSH) (tab. 10).

T a b e l a 10

Wychwytywanie ^{131}J przez tarczycę oraz wydalenie 17-OHCS i 17-KS w moczu 45-letniego mężczyzny zatrudnionego przez kilka lat przy urządzeniu radarowym [wg: Doury i współaut., 1970]

Rodzaj testu		% włączania ^{131}J przez tarczycę
Bez pobudzenia tarczycy	po 6 godz.	13,0
	po 24 godz.	18,5
Po pobudzeniu tarczycy podaniem TSH	po 6 godz.	68,0
	po 24 godz.	93,0
17-OHCS		2,6 mg/24 godz.
17-KS		20,3 mg/24 godz.

Zdaniem autorów tego doniesienia zwiększone wychwytywanie ^{131}J przez tarczycę po pobudzeniu TSH świadczy o przysadkowym pochodzeniu hipofunkcji tarczycy u badanego mężczyzny [Doury i współaut., 1970].

Opisano zespół hipogonadyzmu u 31-letniego mężczyzny narażonego na znaczne gęstości strumienia energii mikrofalowej urządzeń radarowych [Rosenthal i Beering 1968]. Biopsja jądra wykazała zanik kanalików nasiennych, martwicę ogniskową i obrzęk tkanki śródmiąższowej. Trwale utrzymywała się znaczny stopień oligospermia (9 500 000 – 1 500 000 plemników w 1 ml). Stwierdzono prawidłowe wychwytywanie jodu przez tarczycę, prawidłowe ilości 17-KS i 17-OHCS w moczu oraz prawidłową ogólną ilość gonadotropin w moczu. W komentarzu autorzy podali, że ich pacjent był narażony w sposób powtarzalny na gęstości strumienia energii mikrofalowej przekraczające przeszło 3000-krotnie dopuszczalną wówczas gęstość strumienia energii w Siłach Powietrznych USA, tj. 10 mW/cm^2 przy narażeniu ciągłym. Wynika z tego, że gęstość strumienia energii 30 W/cm^2 spowodowała uszkodzenie anatomiczne gonad, natomiast nie wystąpiły zmiany czynnościowe w układzie hormonalnym.

Dokładne badania kliniczne 8 mężczyzn wykonujących naprawy kuchni mikrofalowych wykazały u 40-letniego mężczyzny zmiany patologiczne w skórze prawego uda oraz nieznaczного stopnia hipospermie (40 000 000 plemników w 1 ml nasienia i 60% ruchliwości plemników). Pomiarы wykazały, że w czasie wykonywania napraw po zdjęciu osłony z magnetronu na pracownika działały gęstości strumienia energii 10–22 mW/cm² mikrofal o 2450 MHz [Rose i współaut., 1969]. Badanie histologiczne wycinka jądra nie wykazało zmian patologicznych. W badaniu klinicznym stwierdzono stwardnienie prącia, czyli tzw. chorobę Peyroniego. Autorzy wnioskowali, że stwierdzone zmiany nie były związane z narażeniem na mikrofałe.

Przeprowadzono badania lekarskie i laboratoryjne u 31 techników o stażu pracy 1–17 lat w narażeniu na mikrofałe o 3600 MHz i 10 000 MHz o gęstościach strumienia energii dziesiątków do setek $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ oraz u 30 techników kontrolnych. Wśród narażonych na mikrofałe 22 techników (70%) miało obniżony pociąg płciowy i inne zaburzenia seksualne. Zaburzenia te występowały w zespole astenicznym, jaki stwierdzono u 80% narażonych na mikrofałe. U 23 techników (74%) stwierdzono zmiany w spermatogenezie: 50 ± 24 milionów plemników u narażonych i 60 ± 34 milionów plemników u nie narażonych; $36 \pm 10\%$ ruchomych plemników u narażonych i $54 \pm 19\%$ ruchomych plemników u nie narażonych oraz $70 \pm 6\%$ normalnych plemników u narażonych i $82 \pm 7\%$ normalnych plemników u nie narażonych pracowników, przy czym różnice były wysoce znamienne statystycznie. Wydalanie 17-KS wynosiło $13,37 \pm 2,4$ mg/24 h u narażonych i $14,05 \pm 1,8$ mg/24 h u nie narażonych pracowników, z tym że normalna ilość 17-KS była tylko u 19 narażonych techników. Ogólna ilość wydalanych w dobowym moczu gonadotropin była normalna (10–30 jednostek w próbie na macicy myszy) u 14 narażonych techników, u 4 narażonych była zwiększona i u 1 narażonego technika była poniżej dolnej granicy normalnej (poniżej 10 jednostek), przy czym technik ten (wiek 33 lata, 14 lat narażenia na mikrofałe) miał azoospermie. Autorzy wnioskowali, że ilość wydanych 17-KS świadczyła pośrednio o normalnej funkcji komórek Leydiga w gonadach oraz że normalne lub zwiększone ilości gonadotropin w moczu wykluczały możliwość udziału nierównowagi podwzgórzowo-przysadkowej w spowodowaniu stwierdzonych zmian komórek rozrodczych u zbadanych osób narażonych na mikrofałe [Lancranjan i współaut., 1975]. Przedstawione poniżej wyniki badań na zwierzętach doświadczalnych wykazały, że mogą występować zmiany ilościowe wydzielania przez przysadkę obu hormonów gonadotropowych (FSH, LH) albo też jednego z nich pod wpływem narażenia na pola e-m rozmaitych częstotliwości i natężeń [Mikołajczyk, 1974].

Analiza wyników badań laboratoryjnych i lekarskich u kilku tysięcy pracowników obserwowanych systematycznie przez 6 lat, którzy byli zatrudnieni w narażeniu na mikrofałe, wykazała dwufazowy charakter zmian chorobowych. Badani pracownicy byli narażeni: a) na gęstości strumienia energii rzędu $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ w ciągu 8-godzinnego dnia pracy, ale ze względu na impulsową modulację promieniowania z anten obrotowych efektywny czas narażenia wynosił od kilku do kilkudziesięciu minut; okresowo (przez krótki czas) narażenie osiągało kilkadziesiąt lub kilkaset $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, przy czym w grę wchodziło działanie pola kondensato-

rowego i nieznane wartości pola e-m w strefie bliskiej anteny oraz promieniowanie z jednego lub 2-3 kierunków; b) na gęstości strumienia energii rzędu kilkudziesięciu $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($10 - 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) działające z wielu kierunków przy eksploatacji urządzeń specjalnych; c) na promieniowanie przy remontach, gdzie gęstości strumienia energii wynosiły do kilkuset $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ oraz okresowo ponad $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ lub kilka tysięcy $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Wykonano badanie neurologiczne oraz zapis EEG u 44 osób z grupy a i u 105 osób z grupy c wybranych losowo, nadto u 30 osób z obu tych grup wykonano próbę kardiazolową, podając im dożylnie po 500 mg 5% roztworu kardiazolu w ciągu 10 min. z szybkością 1 ml/30 s z przerwą 30-sekundową. U osób zatrudnionych przez 1 – 3 lata nie stwierdzono wykrywalnych zmian w zapisie EEG w grupie a, natomiast w grupie c stwierdzono wahania wskaźnika fal alfa, polegające na wyraźnym zmniejszeniu odsetka tych fal oraz na ogólnym zubożeniu zapisu w miarę narastania stażu pracy w narażeniu na mikrofałę. Równocześnie stwierdzono wyraźnie gorsze znoszenie próby kardiazolowej przez badane osoby w miarę dłuższego ich zatrudnienia w narażeniu na mikrofałę. Ilościowe wyniki badań przedstawia poniższe zestawienie.

Charakter stwierdzonych zmian	Czas zatrudnienia
Brak zmian	2 osoby ze stażem 1 1/2 roku
Fale theta bez cech napadowości	5 osób ze stażem 3 lata
Fale theta i delta napadowo	18 osób ze stażem 4 – 7 lat
Napad drgawkowy	5 osób ze stażem 5 – 7 lat

Z przedstawionych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Częstość występowania skarg (ból i zawroty głowy, uczucie znużenia, potliwość) wśród osób pracujących w zasięgu mikrofal wykazuje zależność od długości stażu pracy i od stopnia narażenia na promieniowanie.

2. Jedynie u osób narażonych przez dłuższy czas na stosunkowo znaczne gęstości strumienia energii stwierdzono występowanie zmian w zapisie EEG polegających na jego zubożeniu i zmniejszeniu ilości fal alfa.

3. U wszystkich badanych niezależnie od stopnia narażenia i stażu pracy stwierdzono gorszą niż w normie tolerancję na dożylne podanie kardiazolu. Po zbadaniu 30 osób zaprzestano stosowania tej próby w obawie wywołania ujemnych skutków.

4. Większość badanych wykazywała objawy zespołu nerwicopodobnego, zbliżonego do nerwicy neurastenicznej.

5. Rozkład częstości występowania objawów w zależności od długości stażu pracy może wskazywać na występowanie znacznej reakcji w pierwszych latach kontaktu ze środowiskiem opromieniania (pierwsze trzy lata pracy), następnie stopniowej adaptacji i dopiero po upływie dłuższego czasu – ponownego wystąpienia ujemnych skutków [Edelwejn i Barański, 1966]. Uwaga autorów o fazowym występowaniu zaburzeń u osób narażonych na pole mikrofalowe była bardzo trafna, ale odnosi się również do pojawiania się zmian chorobowych u osób narażonych na pola e-m innych przedziałów częstości. Prawdopodobnie tego typu obserwacje zmian w układzie hormonalnym u osób narażonych na pola e-m skłoniły autorów do przyjęcia poglądu o adaptacyjnej roli układu hormonalnego w reagowaniu ustroju ludzkiego i zwierzęcego na energię pól e-m.

Zmiany w zapisie EEG u ludzi i u zwierząt napromienianych mikrofalami i otrzymujących takie środki, jak kardiazol, luminal, strychnina, d-tubokuraryna, chloropromazyna wskazują, że pole e-m może wpływać na czynność synaps pobudzających. Obniżona tolerancja na kardiazol i zwiększona na strychninę w warunkach napromieniania mikrofalami świadczy o potęgującym działaniu mikrofal na aktywację synaps przez kardiazol. D-tubokuraryna pogłębia stan pobudzenia, natomiast chloropromazyna zapobiega temu efektowi [Barański i Edelwejn, 1968].

Przedstawione w poprzednich częściach sprawozdania różnice działania prostych i złożonych pól e-m ujawniają się jeszcze wyraźniej w układzie nerwowym. Zainteresowania badawcze idą nadal w kierunku śledzenia zmian czynnościowych mózgowia (elektroencefalografia — EEG, magnetoencefalografia — EMG), ale coraz więcej badań dotyczy zaobserwowanej w 1974 r. przez Kaczmarka i Adeya zmiany uwalniania $^{45}\text{Ca}^{++}$ z mózgowia zarodków kurzych pod wpływem słabych modulowanych pól e-m. Zainteresowania te są w pełni uzasadnione ze względu na rolę Ca^{++} w wielu procesach czynnościowych i metabolicznych zachodzących w żywych komórkach, w tym także w komórkach układu nerwowego [Marme, 1985].

W przeglądzie badań dotyczących wpływu słabych pól e-m na uwalnianie Ca^{++} z mózgowia stwierdza się [Adey i współaut., 1980], że efekt ten powodują pola radiofale i mikrofale modulowane w funkcji częstotliwości przedziału 0,5 — 50 Hz. Podobny efekt uzyskano dla synaptosomów wyizolowanych z kory mózgowia szczurów i inkubowanych in vitro oraz poddanych działaniu modulowanego pola 450 MHz o gęstościach mocy 0,5 mW/cm².

Pod koniec 1986 r. nastąpiła ostra wymiana poglądów na temat zjawiska wpływu Ca^{++} z mózgowia, opisanego w wielu pracach pochodzących z dwóch ośrodków w USA (prace grupy Adeya i Bawin oraz grupy Blackmana). Wydawało się, że efekt zmian wpływu Ca^{++} z preparatów mózgowia in vitro i z mózgowia in vivo został wielokrotnie potwierdzony z zastosowaniem pól e-m bardzo małej częstotliwości i pól e-m większych częstotliwości modulowanych falami małej częstotliwości, ale okazało się, że słabą stroną wszystkich doświadczeń były niedokładności techniczne związane z działaniem pól e-m oraz niedokładności w prezentowaniu wyników pomiarów wpływu Ca^{++} z badanych preparatów. Prace te skrytykowali najpierw Foster i Guy we wrześniowym numerze Scientific American (1986), na co odpowiedzieli niezwłocznie krytykowani w grudniowym numerze tego samego czasopisma. Skomentowano tę polemikę w magazynie Microwave News (1986, 6, 6). Na domiar niekorzystnej oceny prac wykazujących wpływ pól e-m na wpływ Ca^{++} z mózgowia przeprowadzono niezwykle skrupulatnie kontrolowane badania według oryginalnej metodyki, stosowanej w pracach grupy Blackmana i grupy Adeya i Bawin i nie potwierdzono zmian wpływu $^{45}\text{Ca}^{++}$ z mózgowia kurcząt in vitro pod wpływem pola e-m 147 MHz z modulacją amplitudy 16 Hz i gęstości strumienia energii 0,75 mW/cm². W dyskusji wskazano na możliwe błędy techniczne i na niepoprawność obliczeń statystycznych uzyskanych wyników w pracach wymienionych autorów [Albert i współaut., 1987]. Nie wykazano też różnicy wpływu $^{45}\text{Ca}^{++}$ z izolowanych półkul mózgowia kurcząt poddanych działaniu jednorodnego lub niejednorodnego stałego pola magnetycznego o indukcji 200 — 900 mT w porównaniu z wpływem wapnia z mózgowia zwierząt kontrolnych

[Bellosi, 1986]. Co więcej, entuzjastycznie przyjmowane wyniki stosowania słabych prądów wolnozmiennych w kształcie odpowiednio uformowanych impulsów na gojenie się trudno gojących się złamań kości lub uwapniania kości nie zostały potwierdzone w ściśle kontrolowanych badaniach klinicznych, z których wynikało, że zachowawcze leczenie było równie skuteczne i że takim postępowaniem można wyjaśnić większość sukcesów przypisywanych terapii polem magnetycznym pulsującym [Barker i współaut., 1984].

Wytworzyła się sytuacja, że coraz trudniej uzyskać finanse na prowadzenie badań naukowych dotyczących oceny biologicznego działania pól e-m. Na przykład za 4,5 mln dolarów wyasygnowanych przez lotnictwo USA przeprowadzono doświadczenie, w którym 100 samców szczurów poddawano działaniu pola e-m 2450 MHz (modulacja impulsami 800 Hz, 10 us) o gęstości strumienia energii 0,48 mW/cm² przez 21 godz. dziennie w okresie 25 miesięcy; jednocześnie w odpowiednio kontrolowanych warunkach trzymano 100 samców szczurów kontrolnych. Po zakończeniu doświadczenia stwierdzono 18 nowotworów, w tym 9 nowotworów gruczolów dokrewnych u zwierząt doświadczalnych, i tylko 5 nowotworów, w tym 2 nowotwory gruczolów dokrewnych u szczurów kontrolnych [Guy i współaut., Microwave News, 1985, 5, 2]. Wyniki były tak rewelacyjne, że wystąpiono o sfinansowanie powtórzenia doświadczenia, ale nie uzyskano poparcia. Te wyniki doświadczalne potwierdzają koncepcję działania pól e-m na regulacyjny układ hormonalny w ustroju żywym [Mikołajczyk, 1974].

Dążąc usilnie do objaśnienia mechanizmu obserwowanego zjawiska wpływu Ca⁺⁺ pod wpływem słabych modulowanych pól e-m, niektórzy autorzy wymienionych powyżej prac wysunęli koncepcję rezonansu cyklotronowego na poziomie błon komórkowych. Ruch jonów w stanie takiego rezonansu odbywa się po spirali. Kanalik w poprzek błon komórkowych utworzone są z białek o budowie spiralnej i w takich kanalikach może być ułatwiony ruch jonów podobnie jak w warunkach rezonansu cyklotronowego [Liboff, 1985]. Na tej podstawie próbowano też wyjaśnić wyniki badań, w których stwierdzono, że zwiększenie wpływu wapnia z mózgowia kurczątków następowało tylko wówczas, jeśli częstość stosowanego zmiennego pola magnetycznego (15 Hz lub 45 Hz) była odpowiednio dopasowana do stałego pola magnetycznego o indukcji zbliżonej do naturalnego pola magnetycznego [Blackman i współaut., 1985].

Koncepcję rezonansu cyklotronowego sprawdzono na elementarnym modelu fizycznym opartym na jednej naładowanej cząsteczce w lepkim środowisku, poddanej działaniu zewnętrznych pól stanowiących stałe pole magnetyczne, zmienne pole magnetyczne i zmienne pole E indukowane przez stosowane zmienne pole B. Model ten nie uwzględniał sił wewnętrznych układów biologicznych (siły termiczne, siły gradientu chemicznego i siły pochodzące od innych naładowanych cząsteczek). Poza tym model zakładał bardzo stabilne warunki wzajemnego układu linii sił stosowanych pól. Z trójwymiarowych wykresów amplitud częstotliwości przebiegów sinusoidalnych wynikało, że: 1) amplitudy szczytowe zależą w dużym stopniu od częstotliwości pola; 2) rezonans może wystąpić nawet w przypadku braku działania stałego pola B, ale rezonansy mogą pojawiać się tylko przy określonych częstościach pola, co przemawia za "okienkami amplitudy"; 3) szerokość linii re-

zonansowej nie zależy w istotny sposób od częstotliwości. Obserwacje te objaśniono na podstawie fizycznych zależności pomiędzy naładowaną cząsteczką i zastosowanymi polami e-m. Obliczenia uzyskane na podstawie tego prostego modelu pozwoliły wysnuć następujące wnioski:

1. "Okienka częstotliwości" oznaczają działanie ściśle określonej częstości przy ustalonych wartościach innych parametrów.

2. "Okienka amplitudy" oznaczają występowanie zjawiska tylko dla określonych wartości natężenia zmiennego pola B (ω_{cl}).

3. Czysty transport ładunku nie wystąpi, gdy wzbudzenie powodowane jest przez samo pole E (brak stałego pola B), ale wystąpi w obecności pól magnetycznych (zmiennego lub stałego).

4. Tłumienie zależnie od lepkości silnie wpływa na zjawisko rezonansu i zjawisko wystąpi tylko w przypadku słabego tłumienia lepkościowego (tj. gdy $\gamma < \omega$). Wyrażono też zastrzeżenie wobec przenoszenia wyników uzyskanych na takim prostym modelu na układy bardziej złożone, w tym także na układy biologiczne. Ze względu na silne tłumienie wpływów pól w płynach o dużej lepkości możliwe zjawisko rezonansu cyklotronowego, o ile jest ono w ogóle możliwe, ograniczałoby się tylko do kanalików błon komórkowych [Durney i współaut., 1988].

W innych badaniach obliczeniowych oceniono progowe natężenie pola magnetycznego niezbędne do wywarcia wpływu na dyfuzję cząstek biologicznych w roztworach poprzez siłę Lorentza i wektor naprężenia Maxwella. Uzyskane wyniki wskazują na to, że siła Lorentza ogranicza dyfuzję naładowanych cząstek (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) i białek plazmy krwi, ale progowe wartości tej siły do spowodowania takiego efektu przekraczają 10^4 T. Progowy gradient natężenia pola do spowodowania zmiany w dyfuzji jonowej poprzez wektor naprężenia Maxwella przekracza $10^5 \text{ T}^2/\text{m}$ w odniesieniu do cząstek paramagnetycznych (FeCl_3 , O_2) i białek plazmy. Natomiast na ruch odtlenowanych erytrocytów i koloidów FeCl_3 (o stężeniu ponad 10^3 molekuł) wpływają pola o zwykłym gradiencie poprzez efekt objętościowy (przez zwykłe pole rozumie się w tej pracy pole B o około 1 T i dB/dx około 1 T/cm) [Kinouchi i współaut., 1988].

Dotychczasowe wyniki doświadczalne i obliczeniowe dają podstawy do przypuszczeń, że jeśli nawet może dojść przypadkowo do zjawiska "rezonansu cyklotronowego" na poziomie błony komórkowej w odniesieniu do związanych jonów Ca^{2+} (lub innych paramagnetycznych), to efektem takiego zjawiska może być oderwanie pewnej liczby jonów od błony, co nie ma określonego znaczenia biologicznego, natomiast takie zjawisko "rezonansu cyklotronowego" nie spowoduje przepływu energii e-m do wnętrza komórki, co miałoby istotne znaczenie biologiczne. Wnikanie energii e-m do wnętrza komórki musi polegać na innych mechanizmach niż mało prawdopodobnym zjawisku "rezonansu cyklotronowego".

Z sugestiami wskazującymi na udział nie uwzględnianego stałego naturalnego pola magnetycznego w powodowaniu wpływów biologicznych przez pola e-m (przynajmniej pola e-m słabe i bardzo słabe) wiążą się wyniki szeregu badań doświadczalnych o reakcjach warunkowych u szczurów poddawanych działaniu mikrofal o małych gęstościach strumienia energii i jednocześnie otrzymujących leki hypertermiczne (amfetamina), hipotermiczne (morfina, apomorfina), cholinergiczne

(cholina) lub antynarkotyczne (naloxolone). Uzyskaną znaczną modyfikację działania wymienionych leków u zwierząt poddanych działaniu mikrofal objaśniono wpływem bodźców warunkowych znanych (manipulacja, czynniki stresowe) lub nieznanymi obecnymi w środowisku badań doświadczalnych [Lai i współaut., 1982; 1986a,b,c; 1987a,b; 1988]. Co najmniej część uzyskanych wyników w tych badaniach zależała od niezbyt ściśle kontrolowanych warunków doświadczalnych. W takich badaniach doświadczalnych niezbędne są bowiem dwu- lub nawet trójstopniowe równoległe badania kontrolne.

Silna merytoryczna krytyka metodyki i wyników badań o wpływie słabych pól e-m modulowanych z określoną częstotliwością w funkcji amplitudy lub częstotliwości na zmiany ilościowe uwalniania Ca^{2+} in vitro z mózgowia bardzo młodych kurcząt i niektórych innych zwierząt skierowała uwagę autorów tego typu prac na poszukiwanie innych substancji wrażliwych na działanie słabych i modulowanych pól e-m. Zainteresowano się między innymi enzymem dekarboksylazą ornityny, którego czynność podlega wpływom wielu czynników wzrostowych, w tym także hormonów, wywierających działanie na powierzchni komórek. Wykorzystując układ komórek hodowanych in vitro stwierdzono, że działanie w ciągu 1 godz. pola E 60 Hz o małym natężeniu spowodowało zwiększenie czynności dekarboksylazy ornityny w badanych komórkach [Byus, 1987]. Kontynuując ten kierunek badań, stwierdzono zwiększenie o 50% czynności wymienionego enzymu pod wpływem działania w ciągu 1 godz. pola mikrofal 450 MHz o gęstości strumienia energii 1 mW/cm^2 , modulowanego w funkcji amplitudy z częstotliwością 16 Hz, na hodowle komórek raka wątroby (Reuber H35), komórki jajnika chomików i komórki czerniaka 294T. Takie pole nasilało czynność badanego enzymu już wzmożoną uprzednio przez zadziałanie na komórki estrem forbolu będącym czynnikiem pobudzającym wzrost nowotworów, natomiast nie powodowało zmiany ani podstawowej, ani wzmożonej przez ester forbolu syntezy DNA w badanych komórkach [Byus, 1988]. I do tego nowego cyklu badań można mieć zastrzeżenia natury merytorycznej, że nie stosowano skrupulatnie izolowanych od czynników środowiskowych badań kontrolnych.

Pomiary ilościowe jonów w partiach mózgowia szczurów wykazały: 1) istotne zwiększenie ilości Ca^{++} w korze i w rdzeniu przedłużonym pod wpływem mikrofal 2880 MHz (impulsy 1000 Hz $1,5 \mu\text{s}$) o mocy pochłanianej 10–15 W/kg; 2) istotne zwiększenie ilości K^+ w podwzgórzu i Na^+ w korze mózgowia pod wpływem pola 81 MHz (impulsy 10 Hz) o natężeniu 10–15 V/m; 3) zmniejszenie ilości Ca^{++} w rdzeniu przedłużonym i w zespole międzymózgowie – ciało prążkowane – hipokamp oraz zwiększenie ilości K^+ w korze mózgowia pod wpływem pola 100 MHz (impulsy 10 Hz) o natężeniu 10–15 V/m. U szczurów poddanych jednocześnie działaniu pola 2880 MHz o podanych powyżej parametrach plus pola 27 MHz o natężeniu 200–400 V/m stwierdzono rozmaite przesunięcia Ca^{++} , Na^+ i K^+ w poszczególnych partiach mózgowia, z wyjątkiem podwzgórza [Mikołajczyk, 1984].

Pierwsze wielokierunkowe badania czynności układu nerwowego pod wpływem prostych i złożonych pól e-m przedstawiono w ZSRR [Chołodow, 1966]. Badania te polegały na rejestrowaniu fal EEG u królików poddanych działaniu prostych i złożonych pól e-m, a także pola magnetycznego i pola elektrostatycznego.

W doświadczeniach tych stosowano: a) pole radiofale 4,5 MHz o natężeniach 1000 V/m lub 5000 V/m; b) pole mikrofalowe 2450 MHz c.w. i 100 – 200 lub 1000 mW/cm², przy czym stosowano falę nie modulowaną lub modulowaną w funkcji amplitudy do głębokości 100% i częstotliwości 1, 5, 10 i 50 Hz; c) pole mikrofalowe impulsowe o 2, 10 lub 50 mW/cm² o 575 MHz; d) pole magnetyczne z elektromagnesów o natężeniu 200, 400, 800 lub 1000 Oe; e) pole elektrostatyczne o natężeniu 1,25, 2,5 lub 5 kV/m. Od czasu prac Chołodowa podejmowano coraz częściej badania czynności bioelektrycznej układu nerwowego u zwierząt doświadczalnych oraz zainteresowano się badaniami tego typu u osób narażonych na pola e-m z racji wykonywania zawodu. Niektóre z tych badań świadczą o bardziej niekorzystnym działaniu złożonych pól e-m niż prostych pól e-m. Po wszczępieniu królikom elektrod głębinowych do układu siatkowatego i do rogów Ammona w mózgowiu napromieniano zwierzęta przez 20 min w polu 3000 MHz fali impulsowej o średniej gęstości mocy 20 mW/cm². W normalnych warunkach z układu siatkowatego wzgórze rejestrowano fale nieregularne 6 – 7 Hz i amplitudzie powyżej 200 uV. Bezpośrednio po napromienianiu królików rejestrowano desynchronizację (zwolnienie częstotliwości) fal podstawowych i obniżenie ich amplitudy, a z rogów Ammona rejestrowano także zwiększenie czynności fal theta. W materiale sekcyjnym stwierdzono przekrwienie opon i półkul mózgowia, różnice barwności komórek i sporadyczne występowanie w nich kul metachromatycznych. Tak więc opisane zmiany pod wpływem impulsowego promieniowania mikrofalowego miały głównie charakter czynnościowy [Edelwejn i Barański, 1971].

Mikroelektrodami szklanymi rejestrowano potencjały szczytowe 193 komórek różnych obszarów mózgowia królików przed 10-minutowym napromienianiem ich głowy w polu e-m 460 MHz o 2 lub 5 mW/cm² i po napromienianiu. Największą zmianę aktywności stwierdzono w neuronach podwzgórza i hipokampa, przy czym w neuronach śródmózgowia i jąder wzgórza rejestrowano głównie odpowiedzi hamujące [Faitelberg-Blank i Pierevałow, 1977].

Zastosowanie techniki komputerowej do analizy EEG ujawniło nowe szczegóły działania pól e-m na ośrodkowy układ nerwowy. Króliki napromieniano jedno- lub wielokrotnie w polach e-m o różnych częstotliwościach nośnych przedziału 1 – 10 MHz modulowanych w funkcji amplitudy. Rejestrowano EEG seriami co 3 min. U normalnych zwierząt stwierdzono w zapisie EEG fale 5 – 15 Hz. Po napromienianiu zwierząt przez 2 godz. dziennie w ciągu 6 tygodni w polu e-m o modulacji amplitudy 14 – 16 Hz i natężeniu 500 V/m stwierdzono nasilenie fal 4 Hz oraz osłabienie aktywności w zakresie wyższych częstotliwości. Zmiany takie występowały po około 2 – 3 tygodniach napromieniania. Analiza sumaryczna przeprowadzonych badań wykazała, że w zapisie EEG u zwierząt normalnych dominowały fale 4,5, 8 i 11, Hz, natomiast u zwierząt napromienianych w podanym powyżej polu o 500 V/m występowały głównie fale 2 i 10 Hz. Ekspozycja przewlekła na pola modulowane powodowała zmiany w zapisie EEG w postaci wzmożenia fal małej częstotliwości i osłabienia fal większych częstotliwości (10 Hz). Ostra ekspozycja nie powodowała zaś zmian w EEG pod wpływem pól 1 – 30 MHz o modulacji 6 Hz i natężeniu 0,5 – 1 kV/m [Takashima i współaut., 1979].

W badaniu działania mikrofal na izolowane komórki i tkanki występują trudności techniczne wynikające z szybkiego wysychania takich materiałów. Prawdopodobnie z tych względów uzyskano bardzo rozbieżne wyniki badań izolowanych nerwów i komórek nerwowych napromienianych *in vitro*. W celu zapewnienia odpowiedniej wilgotności i chłodzenia przystosowano odpowiednio falowód do pasma 2450 MHz, stosując cyrkulację płynu Ringera. W takim układzie falowodowym napromieniano nerw kulszowy żaby, nerw strzałkowy kota, nerw błędny królika, zwoje szyjne górne i mięsień przepony szczura mikrofalami 2450 MHz c.w. o 0,3 – 1500 W/kg lub fali impulsowej o szczytowym pochłanianiu mocy 0,3 – 220 kW/kg. Nie stwierdzono charakterystycznych zmian, oceniając potencjały czynne tych preparatów poddanych działaniu mikrofal. W przypadku bardzo dużej mocy pochłanianej obserwowano zmiany, które odtwarzano przez podwyższenie temperatury płynu [Chou i Guy, 1978].

Nerwy obwodowe mogą zachowywać się w polu e-m podobnie jak przewodniki. Stosunkowo dawno temu wykazano w badaniach doświadczalnych, że pod wpływem pola e-m następuje zwiększenie progu pobudliwości i szybkości przewodzenia w nerwach. Zjawiska te obserwowano w nerwie kulszowym żaby pod wpływem impulsowego promieniowania e-m o długości fali 10 cm i 12 mW/cm² [Kamenski, 1964]. Poza zmianami czynnościowymi w nerwach obwodowych pod wpływem pól e-m obserwowano również zmiany anatomiczne. W nerwie kulszowym szczurów trzymanych w ciągu 5 – 30 min w polu e-m 27 MHz wykazano demielinizację i hipermyelinizację, zmiany ilości i struktury włókien kolagenowych w osłonkach oraz uszkodzenie aksonów i komórek Schwanna. Wszystkie te zmiany przypisano raczej efektowi cieplnemu promieniowania e-m, a na podstawie stwierdzonych zmian wyciągnięto wnioski, że pole e-m działa na styku komórek glejowych i komórek nerwowych [Romerro-Sierra, 1974].

Na podstawie znanych z piśmiennictwa wyników badań nad wpływem promieniowania e-m na nerwy opracowano teorię pobudzenia nerwów przez promieniowanie o małych natężeniach [Spiegel i Joines, 1973]. Za podstawę teorii przyjęto dipolowy model błony zależny od budowy wewnętrznej, tj. dwu warstw cząstek lipidów i środkowej warstwy cząstek białka. Model ten zakłada, że błona nerwu ma warstwę dipolową po swojej zewnętrznej i wewnętrznej stronie, zaś w samej błonie jest nadmiar ruchliwych jonów ujemnych, a w bezpośrednim jej sąsiedztwie (w fazie wodnej substancji podstawowej) nadmiar ruchliwych jonów dodatnich. W stanie spoczynku nerwu większość dipoli zewnętrznych i wewnętrznych ma swoje ujemne bieguny skierowane odpowiednio na zewnątrz i do wewnątrz. Zewnętrzna warstwa dipolowa odgrywa kluczową rolę w pobudzeniu nerwu i w stanie spoczynku stanowi barierę dla zewnątrzkomórkowych jonów dodatnich, nie zezwalając na ich wnikanie do błony. Pobudzenie nerwu musi być poprzedzone przez obniżenie potencjału tej zewnętrznej bariery i stan taki może powstać wówczas, gdy dostateczna liczba dipoli warstwy zewnętrznej wykona rotację o 180°, ukazując na zewnątrz swój biegun dodatni. W tej sytuacji obniża się potencjał bariery i powstają warunki do wnikania jonów dodatnich do błony. Taka rotacja dipoli może następować pod wpływem pola e-m. Pole takie może działać na poziomie molekularnym

bądź przez istniejący, bądź przez indukowany moment dipolowy w cząsteczce. Jeżeli zaś cząsteczka nie może mieć żadnego z takich momentów, to nie ma działania pola e-m na nerwy. Możliwe są dwa mechanizmy działania promieniowania mikrofalowego na nerwy. Po pierwsze, jeżeli reorientacja błony dipolowej zależy od rotacji cząstek, to spektrum rotacyjne może znajdować się w paśmie mikrofal i zewnętrzne pole e-m może powodować sprzężenie w wyniku kwantowej absorpcji energii. Po drugie, odwracalna czynność dipoli może być wynikiem odwracalnego momentu dipolowego odpowiedzialnego za rotację dipola o 180° . Tego typu ruch można nazwać ruchem drgającym, przy czym częstotliwość drgań może leżeć w zakresie częstotliwości drgań mikrofalowych.

Wymienione powyżej opisy zaburzeń hormonalnych u osób narażonych na pola e-m wskazują, że układ hormonalny mimo dużej rezerwy czynnościowej może załamać się, ujawniając niedoczynność pochodzenia przysadkowego lub w obrębie obwodowych gruczołów dokrewnych. Przemawiają za tym wyniki badań doświadczalnych na zwierzętach poddawanych działaniu pól e-m rozmaitych częstości w bardziej lub mniej dokładnie kontrolowanych warunkach. Poprzednio i obecnie uzyskane wyniki badań doświadczalnych potwierdzają wpływ pól e-m na układ hormonalny.

Układ hormonalny cechuje się u zwierząt wyższych ścisłymi powiązaniami funkcyjnymi przysadki z podwzgórzem i z gruczołami dokrewnymi obwodowymi (rys. 4), które z kolei mają sprzężenia zwrotne z przysadką i z podwzgórzem. Powiązania takie sprawiają, że pola e-m nie mogą powodować zmian tylko w odosobnionym gruczole dokrewnym, ale wprowadzają zakłócenia funkcjonalne na osiach przysadki i poszczególnych podporządkowanych jej gruczołów obwodowych. Wiadomo na przykład, że gonady męskie są szczególnie wrażliwe na działanie energii e-m, przede wszystkim ze względu na trudności wymiany ciepła z otoczeniem i na ciągły intensywny proces podziałów i różnicowania komórek. Jednakże hipofunkcja hormonalna gonad w wyniku działania pola e-m zależy nie tylko od zahamowania czynności komórek Leydiga, lecz również od hipofunkcji gonadotropowej przysadki [Gunn i współaut., 1961; Mikołajczyk, 1974]. Szczególnymi cechami układu hormonalnego są: duża rezerwa czynnościowa (wynosząca np. 95% dla gonadotropowej funkcji przysadki) i funkcjonowanie rytmiczne (rytmy dobowe, miesięczne, sezonowe). Prawdopodobnie te cechy układu hormonalnego decydują o tym, że pod wpływem słabych natężeń pól e-m otrzymuje się mierzalne zmiany ilości hormonów, ale nie otrzymuje się trwałych patologicznych zmian czynności wydzielniczej gruczołów dokrewnych.

Z fizjologicznego punktu widzenia o potencjalnym wpływie pól e-m na układ hormonalny świadczą następujące ustalenia:

1. Przemiana energii na ciepło w tkankach może modyfikować funkcje osi przysadka – podwzgórze – tarczyca ze względu na istotne znaczenie fizjologiczne hormonów tarczycy w produkcji ciepła w ustroju.
2. Pola e-m mogą stanowić środowiskowy czynnik stresowy działający na adaptacyjną oś podwzgórze – przysadka – kora nadnerczy. W osi tej powstaje reakcja stresowa organizmu na rozmaite czynniki szkodliwe, dające w rezultacie zwiększoną produkcję hormonów kory nadnerczy [Lotz i Michaelson, 1978].

3. Funkcja androgenowa gonad męskich uzależniona jest od odpowiedniej temperatury niższej o 5 – 7°C od ogólnej temperatury ciała. Nadmiar ciepła uszkadza produkcję hormonu męskiego w gonadach, ale efekt pól e-m może dotyczyć całej osi podwzgórze – przysadka – gonady.

4. Neurohormony, tj. acetylocholina i adrenalina, oraz hormony tkankowe, tj. histamina i serotonina, są głównymi mediatorami pomiędzy układem nerwowym i układem hormonalnym. Pola e-m mogą modyfikować uwalnianie i samo działanie hormonów [Mikołajczyk, 1979].

W badaniach nad wpływem pól e-m na czynność tarczycy [Barański i współaut., 1972; Milory i Michaelson, 1972] i na reakcję stresową osi podwzgórze – przysadka – kora nadnerczy [Muraszow i współaut., 1975; Udincew i Moroz, 1974] nie używano powtarzalnych zmian hormonalnych bądź też nie stwierdzono liniowych reakcji hormonalnych w zależności od stosowanych natężeń pola i czasu ekspozycji zwierząt. U zwierząt przystosowanych przez odpowiedni okres do warunków doświadczalnych nie stwierdzono reakcji stresowej na podstawie oznaczeń kortykosteronu w korze nadnerczy i w płazmie krwi szczurów poddanych działaniu mikrofal [Mikołajczyk, 1974]. Krótkotrwałe lub chroniczne działanie słabych pól e-m na zwierzęta doświadczalne powodowało bardziej lub mniej istotne przesunięcia ilości gonadotropin w przysadce, przy czym kierunek tych przesunięć zależał od czasu wykonania oznaczeń gonadotropin po ostatniej ekspozycji zwierząt na pole e-m. Oznaczenia wykonane po 18 – 20 godz. od ostatniej ekspozycji na pole e-m wykazały zmniejszoną ilość FSH i LH w przysadce, natomiast oznaczenia wykonane bezpośrednio po ekspozycji zwiększoną ilość FSH i LH w przysadce. Wyniki te wskazują, że pole e-m pobudza wytwarzanie hormonów gonadotropowych w przysadce, natomiast po zaprzestaniu działania pola e-m wytwarzanie tych hormonów zmniejsza się [Mikołajczyk, 1978]. Szczególnie długotrwałe narażenie na pola e-m prowadzi do ewidentnych hipofunkcji niektórych osi układu hormonalnego. Nie stwierdzono zmian zawartości FSH i LH oraz hormonu wzrostu (GH) w przysadce zwierząt poddanych ostremu napromienianiu w polu mikrofal powodującemu śmierć termiczną zwierząt z powodu przegrzania w ciągu 15 – 20 min. Prawdopodobnie podczas szybkiego narastania przegrzania prowadzącego do śmierci termicznej nie było dostatecznie dużo czasu do powstania zmian ilości hormonów w przysadce [Mikołajczyk, 1979]. W doświadczeniach krótkotrwałych i chronicznych z zastosowaniem słabych pól e-m nie wykryto ukierunkowanych przesunięć zawartości hormonu wzrostu (GH) w przysadce szczurów. Nie stwierdzono również liniowej zależności zmian stężenia GH w płazmie krwi szczurów od gęstości mocy stosowanych pól mikrofalowych [Mikołajczyk, 1979]. Pobudzenie przysadki in vivo wywołaniem z podwzgórza szczurów napromienianych mikrofalami i szczurów kontrolnych wykazało znacznie większą czynność hormonów uwalniających (releasing factors, liberyny) w podwzgórze zwierząt napromienianych niż w podwzgórze zwierząt kontrolnych. Wskazuje to, że ogniwem pierwotnie reagującym na pola e-m w układzie hormonalnym może być podwzgórze [Mikołajczyk, 1979]. Przemawiają za tym stwierdzone zmiany neurosekrecyjne w podwzgórze zwierząt poddanych działaniu pól e-m [Tołgskaja i Gordon, 1971]. Tak więc pola e-m mogą działać na różne piętra układu hormonalnego, ale ujmując ten układ jako wzmacniacz biolo-

giczny (wzmocnienie reakcji w kierunku od podwzgórza do gruczołów obwodowych), można przyjąć, że najczulszym ogniwem tego układu na pola e-m jest okolica podwzgórza [Mikołajczyk, 1979].

Promieniowanie mikrofalowe przyspiesza in vitro transformację adrenaliny w barwne pochodne związku (adrenochrom, leukoadrenochrom), i to jest wynik efektu cieplnego. Podobne zjawisko może występować in vivo, zwłaszcza w tzw. gorących punktach [Kritikos i Schwan, 1976]. Gorące punkty mogą powstawać w głowie zwierząt i ludzi, gdyż kształt i budowa warstwowa głowy (skóra, kość, opony, tkanka nerwowa), zbliżone do kuli, stwarzają sprzyjające warunki do występowania zjawisk rezonansowych, załamania i dobieg fali e-m. Prowadzi to w sumie do koncentracji energii e-m w pewnych punktach, dając podwyższenie temperatury, mimo że natężenie promieniowania padającego nie powoduje efektów termicznych w innych tkankach.

Zainteresowania oceną wpływu pól e-m na układ krążenia wynikają z czynności bioelektrycznej serca. W celu oceny nietermicznego działania mikrofal na narząd krążenia napromieniano serce 72-godzinnych zarodków kurzych w polu e-m 24 GHz o gęstościach mocy 478, 297, 167 lub 74 mW/cm² w ciągu kilku sekund do 3 min. Rejestrowano przy tym EKG podczas całej ekspozycji i po jej zakończeniu. Gęstość mocy 478 i 297 mW/cm² uszkadzała i niszczyła badane preparaty. Przy gęstości mocy 167 mW/cm² uniknięto zwiększenia temperatury powyżej 38°C, a przy 75 mW/cm² utrzymano temperaturę preparatu poniżej 25°C. W takich warunkach stwierdzono znaczne zmiany EKG, tj. skrócenie odcinka QT, podwyższenie i wydłużenie załamka T oraz pojawienie się dużego załamka U. Z badań tych wynioskowano, że mikrofały mogą powodować nietermiczne uszkodzenie serca zarodków kurzych [Paff i współaut., 1963].

Napromienianie potylicy głowy królików w polu mikrofal 2400 MHz fali ciągłej i gęstości mocy 10 mW/cm² w ciągu 20 min nie spowodowało zmiany rytmu pracy serca. Uzyskano natomiast przyspieszenie oddychania królików w wyniku ich ekspozycji na gęstości mocy 40 mW/cm², podwyższenie temperatury przy 80 mW/cm² oraz przyspieszenie akcji serca przy 100 mW/cm² [Kaplan i współaut., 1973]. W dalszych badaniach napromieniano potylicę głowy królików w polu mikrofal 2400 MHz i gęstościach mocy w przedziale 0–80 mW/cm². Przyspieszenie oddychania, wzrost temperatury i przyspieszenie akcji serca występowały tylko pod wpływem gęstości mocy 80 mW/cm². Napromienianie całej grzbietowej powierzchni królików w polu 2800 MHz c.w. lub i.w. o 20 mW/cm² nie ujawniło różnicy działania fali ciągłej i fali impulsowej na wymienione trzy parametry [Birenbaum i współaut., 1975]. Napromienianie izolowanego serca żaby w polach e-m 1,42 GHz lub 3 GHz modulowanych w sposób zsynchronizowany lub nie zsynchronizowany z różnymi załawkami EKG nie wykazały pod wpływem gęstości mocy 0,06 lub 5,5 W/cm² różnicy w akcji serca tych zwierząt i zwierząt kontrolnych [Clapmann i Cain, 1975]. W celu zweryfikowania danych literatury o pojawieniu się tachykardii izolowanego serca żaby po zastosowaniu mikrofal modulowanych impulsowo napromieniano serce żaby in situ salwami 10 μs mikrofal 10 lub 1,42 GHz oraz izolowanego serca żaby podobnymi salwami mikrofal 1,42 GHz i nie stwierdzono zmian akcji serca [Lin i współaut., 1976].

Pole e-m 2,45 GHz c.w. i 5 lub 20 mW/cm² odpowiadających mocy pochłoniętej 4 lub 16,2 mW/g nie powodowało zmian morfologicznych, ultrastrukturalnych i enzymatycznych (dehydrogenazy kwasu mlekowego, transaminazy, fosfokinazy kreatyniny) w mięśniu serca przepiórki japońskiej podczas pierwszych 8 dni rozwoju embrionalnego [Galvin i współaut., 1980]. W izolowanych komórkach mięśnia serca zarodków przepiórki japońskiej stwierdzono zwiększoną przepuszczalność błękitu trypanu pod wpływem ekspozycji w ciągu 90 min na promieniowanie mikrofalowe 2450 MHz c.w. i mocy pochłanianej 10 mW/g. Zmiana przepuszczalności komórek mięśnia serca nie zależała od temperatury podłoża, lecz była najpewniej wynikiem działania mikrofal na orientację molekularną w błonie komórek mięśnia serca [Galvin i współaut., 1981].

dopis
Przedstawione powyżej wyniki badań wskazują, że pola e-m mogą wpływać na układ krążenia poprzez różne mechanizmy, tj. przez układ bodźczo-przewodzący serca, przez unerwienie autonomiczne oraz przez komórki mięśnia serca. Stwierdzone u ludzi narażonych zawodowo na pola e-m zmiany czynności serca na podstawie zapisu EKG (głównie zwolnienie akcji serca) wskazują na podobne mechanizmy działania pól e-m.

W 1961 r. Frey zaobserwował zjawisko powstawania wrażeń słuchowych w postaci pisków, gwizdów, trzasków itp. u ludzi i u zwierząt pod wpływem napromieniania falą modulowaną impulsowo okolicy skroniowej głowy. Od początku badań nad tym zjawiskiem wiadomo było, że do wywołania wrażeń słuchowych należało stosować modulację impulsową promieniowania radiofalowego lub mikrofalowego, gdyż pod wpływem fali ciągłej nie powstawały wrażenia słuchowe. Istota tej różnicy polega na tym, że w impulsie e-m trwającym mikrosekundy szczytowa gęstość energii jest tysiące razy większa niż gęstość energii fali ciągłej. Zbadano także progi gęstości energii e-m niezbędne do wywołania wrażeń słuchowych. Gęstość energii impulsu 3000 MHz do wywołania takich wrażeń wynosiła: u kotów 87-14 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, u szynszyli 7,5-20 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, u psów średnio 5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Średni próg gęstości energii do wywołania wrażeń słuchowych u ludzi wynosił 10,6 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Stwierdzono także brak pojawiania się wrażeń słuchowych pod wpływem impulsów mikrofalowych u ludzi, którzy mieli utratę słuchu w paśmie 8 kHz [Cain i Rissman, 1978].

Jednym z zakładanych mechanizmów powstawania wrażeń słuchowych pod wpływem impulsowego promieniowania e-m może być zamiana energii e-m w tkankach czaszki na energię akustyczną, która drogą przewodnictwa kostnego dociera do narządu Cortiego w ślimaku. Badanie z zastosowaniem dynamicznej holografii interferencyjnej nie wykazało spodziewanych ruchów płytek głowy pod wpływem padającego promieniowania impulsowego. Wysunięto zatem wniosek, że miejscem reagowania na to promieniowanie jest ślimak i że chodzi prawdopodobnie o ekspansję termoakustyczną w obrębie ślimaka [Frey i Coren, 1979]. W nawiązaniu do tych badań ustalono, że ludzie z normalnym słuchem mogą słyszeć impulsowe promieniowanie mikrofalowe o szerokości impulsów 1-30 μs padające na głowę, przy czym energia pochłaniana z pojedynczego impulsu jest rzędu 20 $\mu\text{J}/\text{g}$ i powoduje przyrost temperatury lokalnie rzędu $5 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}$. Na tej podstawie większość autorów przyjmuje, że wrażenia słuchowe pod wpływem impulsów mikrofalowych powstają w wyni-

ku ekspansji termoakustycznej w tkankach czaszki. Zakwestionowano przy tym przydatność metody holograficznej do badania mechanizmów wrażeń słuchowych pod wpływem impulsów mikrofalowych [Chou i współaut., 1980].

19. POLA E-M A UKŁAD ŁĄCZNOTKANKOWY

Penetrująca organizm energia pola e-m przepływa przede wszystkim w przestrzeniach międzykomórkowych należących do układu łącznotkankowego. Wszelkie badania nad ogólnoustrojowymi odczynami układu łącznotkankowego są bardzo trudne, a często wręcz niemożliwe. Ciągłość występowania substancji podstawowej tej tkanki w przestrzeniach międzykomórkowych uniemożliwia zastosowanie metody badawczej, jaką jest usuwanie określonej tkanki lub narządu i obserwowanie następstw tego zabiegu oraz leczenia substytucyjnego. W badaniach wpływu pola e-m na tkankę łączną wykorzystywane są metody pośrednie, w których chodzi głównie o funkcję wiązania i gromadzenia wody w układzie łącznotkankowym oraz o jonowymiennikowy charakter glukozaaminoglikanów (GAG), o zawarte w ich łańcuchach ładunki ujemne i o łatwość zmian konformacyjnych tych łańcuchów po zablokowaniu ładunków. Te właściwości układu łącznotkankowego decydują o jego podatności na wpływ pola e-m, które mogą dotyczyć następujących zmian [Mikołajczyk, 1979]: 1) zwiększona synteza GAG prowadzi do wiązania większej ilości wody, która ze względu na dużą stałą dielektryczną decyduje o pochłanianiu większej ilości energii e-m. Jeżeli jednak woda gromadzić się będzie w powłokach zewnętrznych, to powstaną jednocześnie warunki do jej intensywniejszego parowania i zwiększonego oddawania ciepła z ustroju. Depolimeryzacja GAG prowadzi do zmian przeciwnych, tj. uruchomienia wody uprzednio związanej, co decyduje o mniejszej absorpcji energii e-m; 2) o ruchu wody pomiędzy układem krążenia i substancją podstawową tkanki łącznej decyduje w głównej mierze stan naczyń krwionośnych mikrokrążenia, które pozostają pod wpływem histaminy. Źródłem histaminy na tym poziomie są komórki tuczne, które mogą także reagować na pola e-m; 3) przestrzenie międzykomórkowe zawierające substancję podstawową stanowią miejsca przepływu prądów z pól e-m. Obecność tych przestrzeni i ich szerokość lub brak ich w przypadku bezpośrednich kontaktów komórkowych wpływa na wielkość oporu elektrycznego w danym miejscu tkanki.

Pod wpływem silnego pola mikrofalowego stwierdzono w tkance łącznej skóry in vitro redukcję włączania ^{35}S do GAG skóry, przy czym redukcja wychwytywania siarki wykazywała zależność liniową względem logarytmu dawki energii e-m. W tych samych doświadczeniach stwierdzono redukcję włączania proliny do kolagenu i fosforu do kwasów nukleinowych. Wszystkie uzyskane zmiany spowodowane były efektem termicznym. Redukcja o 50% syntezy badanych substancji występowała pod wpływem dawki energii mikrofalowej około 4750 mJ/cm^2 [Carney i współaut., 1968].

W pierwszym opisie [Valtonen, 1966] dot. występowania gigantycznych komórek tucznych w płynie otrzewnowym szczurów poddanych w ciągu 5 min. działaniu mikrofal o znacznej gęstości mocy padającej autor podał tylko, że generator mikrofal $2425 \pm 25 \text{ MHz}$ pracował z mocą 80 W i że w ciągu tych 5 min ekspozycji temperatura zwierzęcia zwiększała się do 41°C . Tak więc z całą pewnością chodziło o ostry efekt termiczny.

W zawiesinie komórek tucznych z płynu otrzewnowego, eksponowanej in vitro na pole mikrofalowe (3 mW/cm^2), obserwowano zmniejszoną barwliwość metachromatyczną, zmniejszenie suchej masy komórek o 50 – 65% oraz 2 – 3-krotną redukcję włączania ^{35}S do komórek, ale nie obserwowano powstawania gigantycznych komórek tucznych [Sawicki i Ostrowski, 1968].

Wykazano we wszystkich własnych badaniach doświadczalnych komórek tucznych w krezce jelita cienkiego, że pod wpływem chronicznego działania pól e-m zwiększa się ich przeciętna powierzchnia, natomiast pod wpływem jednorazowej ekspozycji zwierząt na działanie mikrofal o mocy pochłanianej powodującej efekt termiczny powierzchnia tych komórek ulegała istotnemu zwiększeniu w następstwie ekspozycji w ciągu kilkunastu minut, a po kilkudziesięciu minutach ekspozycji komórki tuczne wykazywały przeciętnie mniejszą powierzchnię. Te wyniki przemawiają za szybkim reagowaniem komórek tucznych krezki na działanie energii e-m na organizm zwierzęcy.

20. INNE WPŁYWY PÓL E-M

Spośród innych biologicznych wpływów pól e-m istotne znaczenie, mimo ~~rozbieżności~~ *to na zakażenie* wyników, mają odczyny immunologiczne związane z odpornością organizmu na infekcje i na rozwój zmian nowotworowych. W skrócie wymienić można następujące przykłady opisanych zmian: transformacja blastyczna limfocytów pod wpływem mikrofal [Stodolnik-Barańska, 1967], osłabienie odczynu granulocytarnego pod wpływem mikrofal na infekcje [Szmigielski i współaut., 1975], wzmoczenie odporności immunologicznej i hamowanie rozwoju nowotworów pod wpływem mikrofalowego efektu termicznego [Szmigielski i współaut., 1978]. Reakcje odpornościowe w ustroju żywym są powiązane z powstawaniem zmian nowotworowych, przy czym chodzi nie tylko o molekularne odczyny antygen – przeciwciało, ale także o zmiany liczby i aktywności komórek zabijających (killer cells), które niszczą komórki nowotworowe przez ich zabicie. Wspomniano o wpływie pól e-m na tego typu komórki w rozdziale omawiającym zmiany w układzie odpornościowym. Przedstawić należy szeroko komentowane i kontrowersyjne wyniki badań grupowych i epidemiologicznych wiążących narażenie ogólne w środowisku komunalnym i narażenie zawodowe na pola e-m ze zwiększonym ryzykiem występowania niektórych chorób nowotworowych. Badania takie przeprowadzone w okolicach Denver (USA) wskazały na zwiększoną 2 – 3-krotnie częstość chorób nowotworowych, zwłaszcza białaczek, u dzieci mieszkających w pobliżu linii wysokiego napięcia 60 Hz o określonej konfiguracji [Wertheimer i Leeper, 1979]. Dalsze badania podały zwiększoną częstość nowotworów u osób dorosłych mieszkających w pobliżu linii wysokiego napięcia [Wertheimer i Leeper, 1982]. W ślad za badaniami Wertheimera i Leepera przeprowadzono następne z zastosowaniem bardziej rygorystycznych wymagań metodycznych, których wyniki wskazywały na powiązanie narażenia na pola e-m ze zwiększoną częstością białaczek [Milham, 1982; Coleman i współaut., 1983; Peach i współaut., 1985], raka krtani [Vagero i Oliln, 1983; Gilman i współaut., 1985; Lancet, 1983], czerniaka oka [Swerdlow, 1983], nowotworów z komórek neuroblastycznych [Spitz i Johnson, 1985], pierwotnych guzów mózgo-

wia [Lin i współaut., 1985; Spears i współaut., 1988] oraz białaczek szpikowych [Wright i współaut., 1982; McDowall, 1983; Milham, 1985, 1988]. Badanie 53 pracowników zatrudnionych długo w podstacjach linii 50 Hz o 40 kV i 53 pracowników kontrolnych odpowiednio dobranych nie wykazało różnic stanu układu nerwowego, układu krążenia, układu krwi i płodności [Knave i współaut., 1979]. Wśród 157 pracowników zatrudnionych w okresie 1951-1983 w elektrolitycznej wytwórni chloru i narażonych na silne stałe pole magnetyczne (4 – 29 mT) zbadano przyczyny zgonów w porównaniu z przyczynami zgonów ludności Szwecji, stosując wskaźnik lat kalendarzowych i swoiste wskaźniki dla wieku. Główną uwagę zwrócono na częstość występowania raka jako przyczyny zgonów. Nie ujawniono istotnie większego ryzyka raka jako przyczyny zgonów u pracowników narażonych przez wiele lat na silne pole magnetyczne [Barregard i współaut., 1987]. Przeprowadzono badania ankietowe stanu zdrowia 390 pracowników zatrudnionych przy konserwacji linii wysokiego napięcia 50 Hz. Na stanowiskach pracy 287 pracowników wykonano aktualne pomiary natężenia pola E, które wynosiło od 6,8 do 242,6 kV/m/godz. Badanie dotyczyło ogólnego stanu zdrowia, a w szczególności częstości wizyt lekarskich i otrzymanych leków, częstości bólów głowy, stanów niepokoju, natręctw i depresji, objawów somatycznych, zadowolenia z pracy itd. Uzyskane wyniki porównano z analogicznymi wynikami z badań osób grupy nie narażonej na pola e-m. Stwierdzono lepsze wskaźniki ogólnego stanu zdrowia u osób zatrudnionych w narażeniu na pole e-m niż u osób nie narażonych wykonujących prace ręczne w rozmaitych gałęziach przemysłu. Jednakże wśród osób narażonych na pole e-m 50 Hz zanotowano istotne różnice ogólnego stanu zdrowia zależnie od rodzaju zajęcia, regionu kraju, pracy w godzinach nadliczbowych i pracy zmianowej. Po uwzględnieniu poprawek zależnych od rodzaju pracy i jej rejonu nie stwierdzono zależności stanu zdrowia od zmierzonych lub oszacowanych natężeń pól e-m 50 Hz [Broadbent i współaut., 1985]. W badaniu kohortowym obejmującym 3358 pracowników linii elektrycznych i 6703 pracowników stacji rozdzielczych oceniono częstość występowania raka w okresie 1961-1979 na podstawie statystycznych danych populacyjnych w Szwecji. Wskaźnik ryzyka raka (wszystkie umiejscowienia w organizmie) wynosił 1,1 (90% przedział ufności 1,0 – 1,2) u pracowników linii elektrycznych i 1,0 (przedział ufności 0,9 – 1,0) u pracowników rozdzielni. U osób obu tych grup zawodowych nie stwierdzono zwiększonej częstości białaczek ani guzów mózgowia. Jednakże występowała u nich tendencja do większego ryzyka raka narządów moczowych [Tornquist i współaut., 1986].

Wszystkie lub co najmniej większości takich badań epidemiologicznych, wskazujących na powiązanie przyczynowe słabych pól e-m ze zwiększoną częstością chorób nowotworowych, zarzuca się niebranie pod uwagę lub niedokładne skontrolowanie innych czynników środowiskowych, które także mogą być odpowiedzialne za zwiększoną częstość występowania chorób nowotworowych w zbadanych populacjach. Na przykład mogło to być przypuszczalne uwalnianie ołowiu z rur wodociągowych do wody pitnej [Wertheimer i Leeper, 1979], występowanie w środowisku pracy chlorowanych dwufenoli, rozpuszczalników, par metali, żywic epoksydowych lub jakichś nierozpoznanych zagrożeń [Wright i współaut., 1982; Thomas i współaut., 1987].

Podjęmowane są próby wyjaśnienia mechanizmów działania słabych pól e-m na układy: nerwowy, hormonalny i odpornościowy. Jedną z takich prób przedstawił Adey, który ze swoim zespołem przez wiele lat badał zjawisko uwalniania Ca^{++} z mózgowia oraz zmiany w błonach komórkowych pod wpływem słabych modulowanych pól e-m [Adey, 1982]. Wiadomo, że mózgowie wykazuje określoną czynność bioelektryczną rejestrowaną w postaci EEG. Jednakże zakwestionowano czynnościowe znaczenie EEG z punktu widzenia klasycznej fizjologii błon i EEG uznano głównie za "szum motoru mózgowia". Badania polegające na zastosowaniu zewnętrznych pól e-m podobnych pod względem amplitudy i częstości do "fal" EEG uznano za postępowanie błędne. W odniesieniu do sprawy oddziaływania ośrodkowego układu nerwowego z typowymi środowiskowymi falami e-m postawiono dwa pytania: 1) czy dobrze obwarowana komórka nerwowa może wykryć oscylacje elektrochemiczne w płynie ją otaczającym, które to oscylacje są wiele rzędów wielkości słabsze niż gradient potencjału błony; 2) jeśli takie wykrycie jest możliwe, to czy są anatomiczne substraty i jak te substraty wypełniają funkcje wzmocnienia słabych oscylacji pozakomórkowych. Pytania te miały się odnosić nie tylko do mózgowia, ale nasunęły myśl wykonania badań porównywalnych efektów na innych modelach komórkowych, np. osteoblastach, komórkach wysp trzustki, limfocytach T i makrofagach otrzewnej. Koncepcja "wielkiej błony" (greater membrane) zakłada obecność wyspecjalizowanej powierzchni czuciowej błony z umiejscowionymi receptorami przekaźników nerwowych, przeciwciał i hormonów. Powierzchnia ta miałaby także za zadanie wykrywanie słabych oscylacji e-m małej częstości w płynie otaczającym komórkę. Swoista struktura powierzchni "czuciowej" wynika z wystających na zewnątrz sznurów glikoprotein z cząstek wewnątrz błonowych (IMPs — intramembraneous particles) w obrębie dwuwarstwy lipidowej. Glikoproteiny zawierają końcowe aminocukry z licznymi ładunkami ujemnymi. Tworzą one polianionową warstwę na powierzchni komórki. Warstwa ta przyciąga kationy, a zwłaszcza Ca^{++} i H^+ , które zapełniają miejsca wiązania. Swoiste miejsca receptorowe dla neurotransmiterów, hormonów i przeciwciał powstają przez wytworzenie wzorcowego układu w tych glikoproteinach powierzchni komórkowej. Takie sznurowe molekuly mogą wykonywać ruchy po związaniu przeciwciał i hormonów oraz pod wpływem pozakomórkowych pól e-m. Tak rozpoznano po raz pierwszy, że najważniejsze wrażliwości elektrochemiczne komórek pod względem czynników hormonalnych i immunologicznych są określone przez układ mozaikowy elektrycznych ładunków w podłużnych glikoproteinach na pewnym obszarze powierzchni błony. Wymienione właściwości powierzchni błon przyjęto za podstawę wyjaśnienia obserwowanych wielokrotnie wpływów słabych modulowanych pól e-m na zmiany w zapisie EEG i na zachowanie zwierząt. Podobny mechanizm sugerowano przyjmując za podstawę działania modulowanych pól e-m swoistych częstości i amplitudy na tkankę mózgowia i na inne komórki, prowadzącego do zmiany tempa uwalniania Ca^{++} (tzw. efekty okienkowe). Inne badania wskazują na podobny mechanizm działania pól e-m na inne komórki. Stwierdzono zmniejszenie zdolności zabijaczej limfocytów T komórek mastocytoma pod wpływem modulowanego pola 60 Hz. Pod wpływem słabych modulowanych pól mikrofalowych mogą być modyfikowane podziały komórkowe w wyniku ograniczenia wytwarzania cAMP kinazy białkowej. Zastosowane pole magnety-

czne w formie paczek impulsów (impulsy 100 us powtarzane z częstością 4 kHz w paczkach trwających 5 ms i powtarzanych z częstością 15 s) powodowało ograniczenie wydzielania insuliny przez komórki wysp trzustki w hodowli tkankowej. Jednocześnie stwierdzono ograniczenie pobierania wapnia i jego uwalniania z wysp trzustki. Wymienione powyżej obserwacje doświadczalne próbuje się wyjaśnić na podstawie procesów rozsiewania i rozrzutu [Adey, 1982]. Proces rozsiewania lub kooperacyjny występuje w polianionowej warstwie sznurów glikoproteinowych na powierzchni błony. Energia wydatkowana jest na zwiększenie poziomu energetycznego ładunków elektrycznych w glikoproteinach powyżej poziomu podstawowego. W tych warunkach wiele umiejscowionych ładunków sąsiednich wykazuje jednakowy poziom energetyczny, co oznacza ich spójność (koherentność). Tworzą one spójną domenę, która może rozciągać się na pewną odległość na powierzchni komórki. Bardzo słaby bodziec w pewnym punkcie spójnej domeny może spowodować oddanie przez nią energii i powrót do stanu podstawowego. Uwolniona energia może rozchodzić się na przylegające domeny spójne i powodować dalszy zasięg uwalniania energii. Jest to tzw. proces kooperacyjny, czyli wzmacniacz energii danych proporcji, jeśli rozpatrywać proces zasadniczy i wyjście końcowe. Procesy reakcji rozrzutu – rozsiewania są usilnie badane ze względu na duże potencjalne znaczenie w ustaleniu ważnych procesów sygnalizacyjnych w liniowych molekułach biologicznych. Procesy te mogą występować wokół polarnych grup fosfolipidów dwuwarstwy błonowej lub w pobliżu lipoprotein. Oddziaływanie promieniowania e-m może powodować tutaj powstawanie solitonów, paczek energii mogących poruszać się wzdłuż liniowych molekuł z prędkością poddźwiękową. Zorientowane poprzecznie molekuly lipidowe błony mogą stanowić kanał dla przenoszenia sygnałów solitonowych z zewnątrz na wewnątrz błony [Adey, 1982]. Przedstawiony mechanizm oddziaływania słabych modulowanych pól e-m na poziomie komórkowym jest wprawdzie dosyć spójny z punktu widzenia podłoża i procesów elektrochemicznych, ale brakuje w nim uwzględnienia parametru czasu. Wiadomo, że molekularne procesy biochemiczne na poziomie komórkowym zachodzą w czasie rzędu pikosekund i wobec tego proponowany mechanizm oparty na procesach rozsiewu i rozrzutu może być zbyt powolny, aby nadążyć za siłami wynikającymi z energii e-m rozchodzącą się z prędkością światła.

W oddziaływaniu termicznym pól e-m na obiekty biologiczne istotne znaczenie ma częstość padającego pola. Pola e-m małej częstości ze względu na długą falę przenikają przez materiały biologiczne bez wyraźniejszych strat energii, natomiast energia pól e-m dużej i bardzo dużej częstości jest pochłaniana w warstwach powierzchniowych materiału biologicznego, co daje efekt termiczny (nagrzewanie). Okazało się, że do wystąpienia dużego efektu termicznego obiekt biologiczny musi mieć skuteczną średnicę co najmniej 1/10 długości padającej fali e-m. Uznawano więc, że promieniowanie e-m o częstości mniejszej niż 15 MHz mające długość fal 20 m i więcej nie stwarza zagrożenia (tab. 11). O istotnym znaczeniu skutecznej średnicy obiektu biologicznego dla pochłaniania energii e-m świadczy tzw. efekt antenowy oznaczający 3-krotnie większy przyrost temperatury u zwierząt ułożonych ich długą oś równoległą do płaszczyzny padającego promieniowania e-m niż u zwierząt, na które promieniowanie pada prostopadle do

T a b e l a 11

Wymiary obiektu biologicznego i głębokość wnikania fal e-m
[wg: Westin, 1968]

Częstość (MHz)	Długość fali	Wymiary obiektu biologicznego		Głębokość wnikania fal e-m
		minimalny (1/10 długości fali)	optymalny (równy długości fali)	
1	300 m	30 m	300 m	30 – 3 m
15	20 m	2 m	20 m	2 – 0,2 m
200	1,5 m	15 cm	1,5 m	15 – 1,5 cm
3000	10 cm	1 m	10 cm	1 – 0,1 cm
10000	3 cm	0,3 cm	3 cm	3 – 0,3 mm
30000	10 mm	1 mm	10 mm	1 mm – 100 μ m
300000	1 mm	0,1 mm	1 mm	100 – 10 μ m

Częstość (MHz):

– 400

400 – 1000

1000 – 3000

3000 – 10000

10000 –

Pochłanianie energii (%) na przekroju poprzecznym:

50

50 – 100

20 – 100

50

50 (głębokość wnikania wynosi 3 mm)



ich długiej osi. Istotne znaczenie dla pochłaniania energii e-m ma powierzchnia przekroju obiektu biologicznego. Chodzi o tzw. względne pochłanianie na przekroju poprzecznym oznaczające "stosunek energii pochłoniętej pola padającego na przekrój poprzeczny obiektu do energii padającej na taki sam przekrój bez obecności obiektu w polu e-m". Zależnie od częstości pola e-m względne pochłanianie na przekroju poprzecznym może wynosić od 20 do 100% energii padającej. Procent pochłanianej energii w tkankach zależy także od natężenia padającego pola e-m i od właściwości dielektrycznych tkanek (przenikalność, odbicia). Głębokość wnikania energii e-m do tkanek jest odwrotnie proporcjonalna do ilości wody zawartej w tych tkankach (lub w komórkach) i z tego względu energia przenika 10-krotnie głębiej do tkanki tłuszczowej zawierającej bardzo mało wody niż do tkanek zawierających dużo wody (mięśnie, tkanka mózgowia). Należy dodać, że dla organizmu niekorzystne jest zwiększenie temperatury ogólnej nawet tylko o 1°C , gdyż prowadzi to do zwiększenia o 5–14% podstawowej przemiany materii w ustroju, co z kolei zwiększa o 50–100% zapotrzebowanie na O_2 w tkankach. Zwiększenie temperatury zmniejsza zdolność hemoglobiny do przenoszenia O_2 , obniża czas krążenia i stąd upośledza utlenowanie krwi w pęcherzykach płuc. Powstaje względna hipoksja, która zwiększa częstość oddychania i prowadzi do zasadowicy oddechowej, a ta z kolei zwiększa powinowactwo hemoglobiny do O_2 w tkankach. Końcowym wynikiem tych zjawisk jest ograniczenie dostarczania O_2 do tkanek przy ich większym zapotrzebowaniu, co prowadzi do hipoksji w tkankach. W przypadku większego wzrostu temperatury końcowym wynikiem opisanych zjawisk może być obumarcie komórek. Efekt ten może być i jest wykorzystywany w hipertermicznym leczeniu nowotworów. Wiadomo, że około 17% krwi przepływa do mózgowia, a czaszka ma małe przewodnictwo cieplne i stąd każdy przyrost temperatury ma odzwierciedlenie w temperaturze mózgowia, która jest znacznie wyższa niż temperatura ogólna ustroju [Westin, 1968 i tam wcześniejsze piśmiennictwo].

21. EFEKTY BIOLOGICZNE U LUDZI W WYNIKU NARAŻENIA NA DUŻE NATĘŻENIA POLA E-M

Opisano nieliczne przypadki ostrego niezamierzonego lub zamierzonego narażenia na pola e-m o dużych natężeniach, natomiast częstsze były badania osób narażonych na pola e-m z racji wykonywania zawodu w okresie wielu lat. W publikacji z 1967 r. Minecki przytoczył opisany w 1957 r. w piśmiennictwie USA przypadek ostrego napromieniowania mikrofalami anteny radarowej. "Mężczyzna lat 42 znalazł się przypadkowo w wiązce anteny radarowej w odległości około 3 m od anteny. Po kilku sekundach pojawiło się u niego uczucie gorąca w brzuchu na tyle przykre, że pracownik ten odsunął się od anteny przed upływem 1 min. Po 30 min pojawiły się u pracownika silne bóle brzucha i wymioty. Po około 1 godz. lekarz stwierdził umiarkowane objawy wstrząsu (ciśnienie 90/30 mmHg, tętno 72/min.). Osłuchowo nie stwierdzono ruchów perystaltycznych jelit. W obrazie krwi: leukocyty 10 300 (82% obojętnochłonne, 5% kwasochłonne, 10% limfocyty, 3% monocyty). Dalsze badania wykonano w szpitalu, gdzie wstępnie rozpoznano możliwość zatoru bądź zakrzepu w krezce lub przebicie wrzodu żołąd-

ka. Podczas operacji stwierdzono w jamie brzusznej około 500 ml surowiczo-krwawego płynu (płyn okazał się sterylny). Otrzewna koloru ciemnoczerwonego pokryta była licznymi wybroczynami o średnicy około 1 mm. Wyrostek robaczkowy wykazał objawy zgorzeli i został usunięty. Stan chorego po operacji był zadowalający, ale piątego dnia pojawiła się biegunka i rozdęcie brzucha. W kale nie stwierdzono krwi. W szóstym dniu po operacji stwierdzono 17 000 leukocytów i 156 000 płytek krwi w mm³ krwi obwodowej. W dziesiątym dniu po operacji chory znajdował się w ciężkim wstrząsie. Wykonano ponownie otwarcie brzucha i stwierdzono owalny (długości 4 cm) otwór w jelicie cienkim. Po operacji chory nadal był we wstrząsie i po 24 godz. zmarł. Podczas badania anatomopatologicznego stwierdzono m.in. dwa duże wylewy krwi w śledzionie, wyraźne powiększenie śledziony (300 g), małe nadnercza (ciężar łącznie 3 g), w błonie śluzowej jelit bardzo liczne zgrubienia z białą plamką w środku (średnica około 2–3 mm). Badanie histologiczne jelit ujawniło reakcję zapalną podobną do stwierdzonej w wyrostku usuniętym podczas pierwszej operacji. Rozpoznano anatomopatologicznie zapalenie jelit o nieznanej etiologii i zanik nadnerczy. U tego chorego nie stwierdzono zmian patologicznych, które usprawiedliwiałyby stwierdzone objawy". Mimo że w USA wskazywano na to, że opisany przypadek chorobowy nie miał nic wspólnego z narażeniem na promieniowanie mikrofalowe, to jednak w Polsce [Minecki, 1967] uznano możliwość przyczynowego związku powstałych zmian u opisanego chorego z narażeniem na promieniowanie mikrofalowe o bardzo dużej mocy.

W latach 1968–1971 badany był w kilku instytutach medycznych i klinikach w Polsce radiooficer ze statku handlowego. Pracownik ten brał udział w naprawie radaru podczas postoju statku w jednym z portów afrykańskich. Jak potem twierdził, chciał kontrolować wzrokowo działanie radaru, patrząc z bezpośredniej bliskości w rożek promieniujący. Podczas takiej "kontroli" trwającej rzekomo kilka godzin zaściął, wymagał hospitalizacji. Nie wiadomo dokładnie, jakie objawy występowały wówczas u niego, poza tym, że miał wysoką temperaturę. Po kilkudniowym pobycie w szpitalu przewieziony został do Polski i tutaj przechodził badania kliniczne w instytutach i klinikach. Nie udało się odtworzyć warunków narażenia tego pracownika na promieniowanie mikrofalowe, ale wiadomo, że trzymanie przez niego głowy dłuższy czas w bezpośredniej bliskości anteny musiało doprowadzić do ostrego przegrzania w obrębie mózgowia. Późniejsze badania wykazały rozmaite objawy określone ogólnie pojęciem encefalopatii. Szczególnym objawem była wyjątkowa nadwrażliwość na dźwięki i próg słuchu poniżej zerowej linii audiometrycznej. Wykonane przez autora tej monografii pomiary ilościowe hormonów gonadotropowych FSH (test powiększenia jajników u młodych samic szczurów z usuniętą przysadką) i LH (test powiększenia gruczołu krokowego u młodych samców szczurów z usuniętą przysadką) w dobowej zbiorce moczu wykazały: 7,7 jedn. międzynarodowych/24 godz. – FSH przy normalnej zawartości w moczu dorosłego mężczyzny 8,5 ± 3,6 jedn. międzynarodowych/24 godz. Nie wykazano natomiast obecności LH w moczu badanego chorego (normalna ilość w moczu dorosłego mężczyzny wynosi kilka jednostek LH na dobę). Podany powyżej przypadek ostrego narażenia na promieniowanie mikrofalowe nie został udokumentowany ani pod

względem wielkości narażenia, ani pod względem obrazu klinicznego. Podany związek opis ma na celu zwrócenie uwagi na ilościowe zmiany wydalanania (a tym samym i wydzielania) hormonu gonadotropowego LH, co obserwowano tak u zwierząt doświadczalnych poddawanych działaniu pól e-m, jak i ludzi narażonych na pola e-m z racji wykonywania zawodu.

3) W 1978 r. podczas Zgromadzenia URSI w Helsinkach przedstawione zostały dwa przypadki ostrego narażenia na mikrofałę [Servantie i współaut., 1978]. Przypadek 1. dotyczy młodego mężczyzny, który nie był zatrudniony przy radarze, ale uległ przypadkowo narażeniu na dużą gęstość mocy mikrofał o 9,4 GHz od anteny radarowej przez 5 – 6 min. W następnych dniach wystąpiły u niego następujące objawy: bóle głowy, zaburzenia równowagi, drżenia; po 3 tygodniach typowy zespół Parkinsona. Przypadek 2. dotyczy młodego mężczyzny zatrudnionego przy radarze; mężczyzna ten z własnej inicjatywy trzymał głowę w osi anteny parabolicznej radaru, emitującego mikrofałę o 9,4 GHz, przez około 1 godz., lekceważąc uczucie ciepła. Po 6 godz. wystąpił u niego zespół oponowo-mózgowy wymagający miesięcznej hospitalizacji.

4) Opisano szereg przypadków oparzenia rąk w wyniku korzystania z uszkodzonych kuchni mikrofalowych, w których zawiodły blokady i nie wyłączała się moc po otwarciu drzwiczek kuchni [Dickason i Barutt, 1984; Tintinalli i współaut., 1983; Ciano i współaut., 1981; Flack, 1983; Zambrano i Boswick, 1984]. Uszkodzenia te powodowały parestezje utrzymujące się długostrawnie.

5) Najbardziej zdumiewające ostre uszkodzenia mikrofalowe opisano u dwóch noworodków poparzonych od kuchni mikrofalowych. W pierwszym wypadku matka przyniosła 5-tygodniowe niemowlę (dziewczynkę) do kuchni, położyła na desce do prasowania stojącej przed kuchnią mikrofalową, którą włączyła na 45 – 60 s dla podgrzania pokarmu, i poszła do górnego pokoju po zmianę bielizny dla dziecka. Po powrocie zauważyła, że dziecko jest bardzo niespokojne, ma oparzenie na lewej ręczce oraz inne oparzenia na nóżce i na klatce piersiowej. W izbie przyjęć szpitala stwierdzono duży niepokój i pobudzenie dziecka oraz oparzenia na całej grubości tkanek obejmujące 11% powierzchni ciała. U noworodka przeprowadzono 4 zabiegi operacyjne polegające na wycięciu uszkodzonych tkanek i na dokonaniu przeszczepów oraz na odpowiednim postępowaniu z oparzeniami. Dokonano amputacji śródręcza z dużym palcem lewej ręki i przedniej części prawej stopy oraz przeszczepiono skórę na ponad 50% przedniej powierzchni klatki piersiowej. Pod spalonym naskórkiem i skórą była prawie nie uszkodzona tkanka tłuszczowa, pod którą znów były spalone mięśnie. Po 7 miesiącach leczenia dziecko było w dobrym stanie. Matka nie wygrała dwóch procesów o odszkodowanie, gdyż zaraz po wypadku fachowcy stwierdzili, że kuchnia mikrofalowa była w dobrym stanie. W drugim wypadku 14-miesięczny chłopczyk został umieszczony przez nianię w kuchni mikrofalowej na 60 s, co zeznała po zastosowaniu testów wykrywających kłamstwo podczas przesłuchań policyjnych. Chłopiec doznał uszkodzenia w postaci opatrzenia drugiego i trzeciego stopnia na obszarze tkanek 12 x 18 cm w środkowej części pleców. Badanie neurologiczne nie wykazało zmian. U dziecka przeprowadzono liczne przeszczepy skóry. W ciągu 10-letniej obserwacji dziecka po

wypadku nie stwierdzono pozostałości emocjonalnych, efektów poznawczych ani fizycznych i dziecko uczęszczało do szkoły dla uzdolnionych dzieci. Nie wykazano zmian kataraktalnych ani innych nieprawidłowości wzroku [Randell i współaut., 1987]. Efekt termiczny wywołany w sposób zamierzony wykorzystywany jest do celów leczniczych w postaci krótkofalowych zabiegów diatermicznych (diatermia pojemnościowa lub indukcyjna) i zabiegów mikrofalowych (diatermia radiacyjna). Znane od dawna biologiczne zjawisko większej wrażliwości na ciepło komórek młodych i dzielących się niż komórek normalnych wykorzystano do celów doświadczalnych i leczniczych z zastosowaniem przegrzewania ciepłem konwencjonalnym lub środkami gorączkotwórczymi. Zasadnicza trudność w stosowaniu tego typu hipertermii polegała na ograniczonej możliwości sterowania dozowaniem i koncentracją energii cieplnej. Nowe możliwości zastosowania hipertermii leczniczej powstały z chwilą skonstruowania dozymetrów i aplikatorów energii promieniowania niejonizującego (mikrofale, radiofale). Aplikatory umożliwiły stosowanie energii e-m do leczenia nowotworów w tkankach powierzchniowych, natomiast aplikatory połączone z dozymetrami i czujnikami temperatury umożliwiły stosowanie hipertermii do leczenia głębiej zlokalizowanych nowotworów (płuca, mózgowie, gruczoł krokowy, pochwa, macica). Ogniskowanie energii e-m umożliwiło podjęcie prób leczenia nowotworów w trudno dostępnych okolicach ciała. W wyniku powtarzanego wywoływania hipertermii lokalnie w tkankach zmienionych nowotworowo uzyskiwano ustąpienie zmian, remisję lub poprawę ogólnego samopoczucia, ale w wielu przypadkach nie uzyskano żadnych efektów leczniczych. Lepsze wyniki lecznicze osiągnano w wyniku kombinowanego leczenia hipertermią i promieniowaniem jonizującym albo hipertermią połączoną z chemioterapią. Okazało się przy tym, że niektóre nowotwory, np. czerniaki, wykazują dużą wrażliwość na hipertermię radiofalową. Nadto nowotwory mogą reagować wybiórczo na pola e-m określonej częstotliwości. W czasie hipertermii doprowadza się najczęściej zwiększenie temperatury tkanek do 42–43°C, po czym czujniki temperatury wyłączają automatycznie generator pól e-m i dzięki temu zapobiega się termicznemu uszkodzeniu tkanek. Dotychczasowe wykorzystanie hipertermii w leczeniu nowotworów dało dosyć zachęcające wyniki i metoda ta nadal jest doskonała i rozwijana [Cavaliere i współaut., 1967; Kantor i współaut., 1978; Webb i Booth, 1971; Anlich i współaut., 1978; Gautherie, 1979; Bellosi i współaut., 1980; Arcangeli i współaut., 1980; Nguyen i współaut., 1980; Luk i współaut., 1981; Israël i Besenval, 1981; Yerushalmi i współaut., 1986; Mitsuyuki i współaut., 1986].

22. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA BADAŃ WŁASNYCH

W badaniach doświadczalnych przeprowadzanych na zwierzętach przywiązywano istotne znaczenie do dokładnie kontrolowanych warunków. Chodziło przy tym nie tylko o takie same manipulacje ze zwierzętami kontrolnymi i doświadczalnymi, ale również o co najmniej 14-dniową wstępną adaptację zwierząt do warunków doświadczalnych przed rozpoczęciem zasadniczych badań, zwłaszcza w przypadku krótkotrwałego lub ostrego działania pól e-m. Kontynuowano badania nad ostrym



działaniem pól e-m, nad działaniem prostych, złożonych i kombinowanych pól e-m o nietermicznych natężeniach, nad działaniem pól e-m ELF i LF oraz nad działaniem monitora ekranowego na zwierzęta. Do badań używano młodych dorosłych szczurów lub szczurów niedojrzałych, jeśli chodziło o śledzenie tempa ich wzrastania pod wpływem stosowanych pól e-m. Po zakończeniu ekspozycji zwierząt na pole e-m przeprowadzano następujące pomiary: ciężar zwierząt i niektórych narządów; przewodność właściwą w GSP (gruczoł ślinowy podżuchwowy) i w korze mózgowia z zastosowaniem sondy 4-elektrodowej i prądu 20 kHz; obliczenie procentowej ilości wody w niektórych narządach na podstawie różnicy ich świeżej i suchej masy, przy czym suszenie narządów przeprowadzano w konwekcyjnym strumieniu powietrza o temperaturze 45°C; oznaczenie ilości Na^+ , K^+ i Ca^{++} w GSP i w pięciu partiach mózgowia; mikroskopową metrologiczną ocenę komórek tłuszczowych w krezce jelita cienkiego; pomiar ilości hormonów tropowych w przysadce (STH — test puszczelowy, LH — test powiększenia gruczołu krokowego, FSH — test powiększenia jajników); pomiar ilości kortykosteronu we krwi obwodowej i w nadnerczach; pomiar DNA w niektórych narządach (metodą fluorymetryczną z zastosowaniem bisbenzoimidazolu (odczynnik 33258, Hoecht) [Labarca, 1980; Downs i Wilfinger, 1983] oraz pomiar RNA w tych samych narządach na podstawie reakcji z orcyngą [Miller i współaut., 1951]. Otrzymane wyniki badań porównywano statystycznie, stosując test "t" dla prób małej liczebności. Poza tym przeprowadzono także, we współpracy z lekarzami przemysłowej służby zdrowia sprawującymi opiekę nad pracownikami odpowiednich zakładów przemysłowych i biurowych, badania grupowe narażonych na pola e-m. Warunki ekspozycji zwierząt podane są w tabelach przedstawiających wyniki liczbowe badań (tab. 12-18).

W zdecydowanej większości zastosowanych pól e-m zwierzęta doświadczalne o ciężarze wyjściowym porównywalnym z ciężarem zwierząt kontrolnych wykazały spowolnienie tempa wzrastania w stosunku do zwierząt kontrolnych w różnym okresie ekspozycji. Wyjątek stanowiło pobudzenie tempa wzrastania szczurów przez pole 50 Hz o natężeniu 50 V/m.

W wyniku działania pól e-m stwierdzono zmiany ciężaru przysadki i jąder (gonad) u samców szczurów, zmiany przewodności właściwej w gruczole ślinowym podżuchwowy (GSP) i w korze mózgowia, ilościowe zmiany zawartości Na^+ , K^+ i Ca^{++} w niektórych partiach mózgowia. U zwierząt nie przystosowanych do warunków doświadczalnych obserwowano reakcję stresową w postaci zwiększonej ilości kortykosteronu we krwi i zmian ciężaru nadnerczy. U zwierząt przystosowanych do warunków doświadczalnych brak różnic ciężaru nadnerczy i ilości kortykosteronu u zwierząt doświadczalnych i kontrolnych może być wskaźnikiem braku reakcji stresowych. Jednakże pod wpływem pól e-m 1-45 kHz. poza spowolnieniem tempa wzrastania, zmiany ciężaru przysadki i gonad stwierdzono zwiększenie lub zmniejszenie ciężaru nadnerczy zależnie od długości okresu powtarzanej ekspozycji tak na pole E, jak i pole H tej samej częstotliwości. W tych ostatnich doświadczeniach stwierdzono także zmiany ilościowe jonów Na^+ i K^+ w niektórych partiach mózgowia, z tym że wielkość i częstość występowania zmian wykazywały nieliniową zależność od częstotliwości i natężeń pola e-m. W innych dotychczasowych badaniach stwierdzono m.in.:

Wartości parametrów biologicznych u szczurów kontrolnych
i poddanych działaniu pól e-m

Badane parametry u szczurów (10 szczurów w grupie)	Pole E, 1 kHz, 200 V/m, 4 h/dzień przez 50 dni			Pole E, 10 kHz, 320 V/m, 4 h/dzień przez 55 dni			Pole E, 25 kHz, 320 V/m, 4 h/dzień przez 45 dni	
	K	Da	Db	K	Da	Db	K	D
Ciężar (g):								
początkowy	108 9	104 14	106 11	101 7	104 8	111 9	80 7	83 6
końcowy	275 20	271 19	271 12	278 25	268 19	274 15	254 21	247 14
przyrost (%)	251	261	256	275	258	248	318	298
Przysadka (mg)	7,3 0,9	7,9 1,6	7,3 0,7	8,5 1,1	7,0 0,6	7,4 1,2	7,4 0,5	7,0 0,4
Nadnercza (mg)	46,8 4,9	43,4 4,3	44,2 3,3	57,0 5,5	50,4 7,8	52,4 2,9	44,9 7,1	42,2 5,2
Przewodność GSP (mS/m)	46 13	50 9	48 9	52 7	45 9	49 10	70 8	64 10
kora mózgowa	161 15	151 8	169 11	170 11	159 14	157 10	226 25	237 10
Na ⁺ (μg/100 mg):								
GSP	174 25	202 38	211 39	170 27	198 29	199 25	-	-
mózdzek	332 25	343 27	329 30	310 [*] 30	329 [*] 30	362 [*] 23	379 [*] 42	426 [*] 45
rdzeń przedłużony	212 24	230 22	234 17	138 [*] 9	149 [*] 26	172 [*] 30	231 [*] 7	222 [*] 15
podwzgórze	322 22	339 25	361 30	277 [*] 37	313 [*] 17	330 [*] 13	270 17	250 23
śródmózgowie	328 [*] 17	365 [*] 13	382 [*] 22	277 [*] 23	322 [*] 15	360 [*] 22	327 27	297 30
kora mózgowa	294 [*] 32	327 17	357 [*] 16	296 [*] 22	356 [*] 25	358 [*] 24	420 [*] 26	365 [*] 21
K ⁺ (μg/100 mg):								
GSP	1028 111	1109 70	1144 61	983 98	990 104	1061 91	-	-
mózdzek	1132 61	1148 45	1112 76	1267 44	1278 129	1349 119	1203 49	1280 97
rdzeń przedłużony	737 [*] 61	841 [*] 67	859 [*] 50	807 37	825 102	806 44	868 23	808 101
podwzgórze	1050 99	1088 79	1126 83	1109 [*] 83	1207 [*] 49	1220 [*] 38	1088 84	1045 74
śródmózgowie	1017 58	968 39	899 41	1192 [*] 115	1271 [*] 83	1317 [*] 71	1090 79	1091 50
kora mózgowa	892 61	868 37	868 50	1266 [*] 104	1475 [*] 107	1457 [*] 71	1315 91	1241 67

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe

* Tkanka wysuszona. GSP – gruczoł ślinowy podżuchwowy

Wyniki pomiarów niektórych parametrów biologicznych
u szczurów kontrolnych (K) i u szczurów poddanych działaniu pola
elektrycznego (E) lub magnetycznego (H)

Parametr biologiczny	8 kHz, 4 h/dzień przez 20 dni (7 00 w grupie)			10 kHz, 4 h/dzień przez 45 dni (10 00 w grupie)			25 kHz, 4 h/dzień przez 40 dni (10 00 w grupie)	
	K	E 9000 V/m	H 210 A/m	K	E 3000 (a)	V/m (b)	K	E 3000 V/m
Ciężar (g):								
początkowy	145 7	147 8	140 10	115 14	119 14	119 11	91 6	94 8
końcowy	224 9	229 19	226 13	299 21	291 28	293 17	291 21	261 29
przyrost (%)	155	156	153	260	245	246	320	278
Przysadka (mg)	6,0 0,6	6,8 1,1	6,6 0,6	7,6 1,3	7,1 1,0	7,3 1,2	8,4 1,0	7,6 1,0
DNA (µg/1 mg)	1,59 0,59	1,67 0,76	2,42 1,25	-	-	-	-	-
RNA (µg/1 mg)	29,2 3,79	28,4 4,60	31,1 6,98	-	-	-	-	-
Nadnercza (mg)	37,4 6,4	44,2 4,7	42,7 7,7	51,5 7,6	50,8 7,1	47,3 5,1	50,3 6,4	49,5 4,8
GSP (mg/100 g)	100 7	96 9	101 7	102 11	100 7,6	93 10,5	120 16	106 13
Nerka lewa (mg)	863 54	904 73	896 75	996 111	989 144	982 104	961 80	920 100
Jądra (mg)	2689 256	2690 147	2719 100	3235 82	3005 229	3135 400	3305 315	3117 225
Przewodność (mS/m):								
GSP	70 5	63 10	65 9	81 16	82 13	79 14	76 9	72 88
kora mózgowa	210 12	209 10	226 13	230 18	228 8	225 12	235 9	240 13
Ilość wody (%):								
kora mózgowa	79,1 0,13	79,0 0,32	78,9 0,19	-	-	-	-	-

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe
GSP – gruczoł ślinowy podżuchwowy

Wyniki pomiarów niektórych parametrów biologicznych
u szczurów kontrolnych (K) i u szczurów poddanych działaniu pola
elektrycznego (E) lub magnetycznego (H)

Parametr biologiczny	45 kHz, 4 h/dzień przez 22 dni			41 kHz, 4 h/dzień przez 45 dni			41 kHz, 4 h/dzień przez 28 dni		
	(7 szczurów do w grupie)								
	K	E 9000 V/m	H 70 A/m	K	E 6000 V/m	H 120 A/m	K	E 9000 V/m	H 210 A/m
Ciężar (g):									
początkowy	73 5	89 6	85 4	99 6	99 10	96 10	114 9,5	118 10	125 6
końcowy	217 21	242 15	226 9	300 17	287 23	281 37	247 14	248 22	255 21
przyrost (%)	297	272	266	304	289	292	216	210	203
Przysadka (mg)	6,0 0,8	6,9 0,9	6,5 0,4	7,9 0,8	7,8 1,1	7,8 1,2	7,0 0,6	7,0 0,7	7,3 0,8
DNA (µg/1 mg)	5,04 0,83	2,45 0,62	3,21 1,01	2,07 0,61	1,97 0,88	2,61 0,60	3,40 1,24	3,20 0,49	3,40 0,77
RNA (µg/1 mg)	20,9 3,9	17,7 1,8	16,5 3,3	15,8 4,2	13,2 5,5	12,2 4,2	19,2 2,9	20,4 3,3	18,1 4,6
Nadnercza (mg)	41,8 8,0	50,9 9,0	47,7 4,0	50,6 3,8	47,7 9,2	46,1 4,2	49,0 3,0	44,5 9,5	39,7 6,0
GSP (mg/100 g)	102 10	97 7	102 10	84 8	85 5	82 6	98 11	86 6	85 7
Nerka lewa (mg)	725 64	818 76	769 75	977 108	956 79	899 146	885 85	862 86	873 121
Jądra (mg)	2622 295	2780 249	2791 237	3030 204	3129 176	2905 254	2899 192	2798 321	2879 222
Przewodność (mS/m):									
GSP	69 6	68 11	68 14	71 6	70 9	61 13	61 9	54 8	55 5
kora mózgowa	197 10	219 18	239 21	211 5	225 22	227 16	242 13	231 13	229 8
Ilość wody (%):									
kora mózgowa	79,1 0,3	78,7 0,4	78,7 0,4	78,8 0,3	78,6 0,2	78,6 0,2	-	-	-

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe

GSP – gruczoł ślinowy podżuchwowy



Ilość Na^+ i K^+ w partiach mózgowia szczurów kontrolnych
i szczurów poddanych działaniu pola e-m

Partie mózgowia i GSP	Warunki ekspozycji w polach e-m							
	10 kHz, 300 V/m 4 h/dzień, 36 dni			45 kHz, 4 h/dzień 22 dni			75 kHz, 10 V/m 4 h/dzień, 55 dni	
	K	Da	Db	K	E 9000 V/m	H 70 A/m	K	D

Na^+ ($\mu\text{mole/l g}$):

GSP	138 17	122 13	128 12	136 14	127 11	138 20	-	-
móżdżek	223 17	233 9	233 12	193 ^f 16	185 13	189 10	219 17	220 14
rdzeń przedłużony	170 7	160 10	163 8	150 8	147 9	153 9	169 18	170 10
podwzgórze	217 18	217 10	218 7	200 13	197 7	182 4	202 17	210 10
śródmózgowie hipokamp ciało prążkowane	209 13	213 11	210 12	177 7	173 9	176 10	205 9	200 10
kora mózgowa	215 15	208 13	209 14	210 14	204 24	205 24	194 10	194 9

K^+ ($\mu\text{mole/l g}$):

GSP	403 32	421 27	414 24	407 18	424 18	410 17	-	-
móżdżek	573 32	586 28	566 39	488 54	468 22	470 21	529 38	537 24
rdzeń przedłużony	383 23	368 28	381 24	379 36	368 24	371 24	389 35	384 28
podwzgórze	470 25	481 49	482 21	534 43	525 37	500 17	455 13	475 27
śródmózgowie hipokamp ciało prążkowane	514 26	532 28	505 18	517 23	518 28	525 23	494 17	506 17
kora mózgowa	572 35	560 36	583 40	491 29	482 12	480 44	477 9	492 32

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe



Wyniki pomiarów niektórych parametrów biologicznych
u szczurów kontrolnych (K) i u szczurów trzymanych w pobliżu
monitora ekranowego (Ek)

Parametr biologiczny	♂♂ szczury po 5 w grupie trzymane pod ekranem mo- nitora (Ek) lub pod kine- skopem (K) 4 h/dziennie przez 27 dni		♂♂ szczury po 5 w grupie trzymane pod ekranem mo- nitora (Ek) lub pod kine- skopem (K) 4 h/dziennie przez 38 dni	
	K	Ek	K	Ek
Ciężar (g):				
początkowy	155 9	157 14	84 4	82 9
końcowy	198 15	194 5	269 18	272 34
przyrost (%)	128	124	321	332
Przysadka (mg):	9,32 1,71	8,66 0,89	7,80 1,00	7,34 0,50
DNA (µg/1 mg)	3,26 0,47	4,07 0,94	5,74 1,10	5,96 1,40
RNA (µg/1 mg)	27,17 9,63	34,12 5,40	11,64 2,60	14,40 9,60
Nadnercza (mg):	59,00 3,70	53,10 9,70	53,20 4,60	47,70 6,30
DNA (µg/1 mg)	5,71 1,03	5,26 1,37	7,39 0,60	8,54 2,00
RNA (µg/1 mg)	15,10 0,60	16,52 2,30	18,25 2,70	20,28 2,40
Jajniki/jądra (mg):	74,00 7,50	72,40 9,30	2828 152	3048 408
DNA (µg/1 mg)	4,54* 0,80	5,03* 1,40	339** 28	296** 48
RNA (µg/1 mg)	16,00* 4,00	17,80* 2,00	1099** 86	1108** 162
Podwzgórze (mg):				
DNA (µg/1 mg)	-	-	7,05 1,10	4,69 0,60
RNA (µg/1 mg)	-	-	9,14 3,00	9,42 2,20

* µg/1 mg

** µg/100 mg

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe

Wyniki pomiarów niektórych parametrów biologicznych u szczurów po 30 minutach narażenia na 40°C temperatury otoczenia lub na pola e-m 27,12 MHz fali ciągłej, 2880 MHz w impulsach 1,5 us i 1000 Hz albo 9500 MHz w impulsach 0,5 us i 1000 Hz (efekt termiczny)

Rodzaj narażenia (liczba zwierząt)	Ciężar (g)	Tempe- ratura okresowa (°C)	Ciężar (mg)		Przewodność (mS/m)			Ilość wody (%)			
			GSP	nerka	GSP	kora mózgowa	nerka	GSP	mózgo- wie	nerka	krew obwodowa
K. Kontrolne (11)	360 21	38,3 0,4	294 30	1138 98	102 11	265 25	404 48	73,3 1,0	76,2 0,6	75,6 0,3	78,1 0,7
T. Temperatura otocze- nia 40°C (10)	361 33	40,3 0,4	369 53	1103 92	292 73	259 13	385 49	78,7 1,6	76,4 0,2	75,3 1,0	77,7 0,6
D. Diatermia (13) 27,12 MHz SAR 10,5 W/kg	352 40	40,8 0,5	339 29	1163 137	180 87	260 17	319 40	77,1 2,2	76,5 0,6	75,3 0,7	78,0 1,4
M. 2880 MHz imp. (10) SAR10,5W/kg	359 25	40,9 0,5	360 45	1083 97	353 112	259 16	366 51	76,8 0,7	76,1 0,4	74,6 1,1	76,8 0,7
G. 9500 MHz imp. (10) SAR 10,5 W/kg	328 23	40,95 0,50	333 27	1144 99	160 58	263 15	323 21	78,4 0,6	77,4 0,5	75,3 0,8	78,4 0,6

Różnice statystycznie istotne co najmniej przy p 0,05

GSP — gruczoł ślinowy podżuchwowy płat lewy

* Nerka lewa

SAR obliczono z przyrostu temperatury po 100 s działania pola e-m na fantom 10 x 10 x 10 cm ze styropianu zawierający 500 ml 0,85% NaCl

Wartości parametrów biologicznych u szczurów kontrolnych (K)
i poddanych działaniu pól e-m (D)

Parametry biologiczne u samców szczurów (10 samców w każdej grupie)	Warunki ekspozycji w polach e-m						
	10 kHz 300 V/m 4 h/dzień 36 dni			10 kHz 3500 V/m 4 h/dzień 28 dni		75 kHz 10 V/m 4 h/dzień 55 dni	
	K	Da	Db	K	D	K	D
Ciężar (g):							
początkowy	71 5	70 4	73 6	79 8	84 8	68 4	69 3
końcowy	252 23	241 13	245 20	240 21	238 22	296 29	285 18
przyrost (%)	354	345	338	306	285	437	414
Przysadka (mg)	7,2 0,8	7,1 1,5	6,9 1,0	7,4 1,1	7,0 0,8	7,2 1,0	8,2 0,5
Nadnercza (mg)	43,8 6,3	43,7 6,9	44,5 8,9	46,0 5,0	42,9 7,0	49,5 5,0	49,4 5,8
GSP (mg/100 g ciężaru)	91	95	98	90	92	85	95
Nerka lewa (mg)	876	853	893	862	824	867	929
Jądra (mg)	3096	2975	2963	2805	2779	3321	3218
Przewodność (mS/m):							
GSP							
kora mózgowa							

Liczby oznaczają wartości średnie i odchylenie standardowe

* – tkanka wysuszona, GSP – gruczoł ślinowy podżuchwowy

1. Istotnie zwiększoną długość przeżycia zwierząt z usuniętą przysadką niż zwierząt normalnych, w polu mikrofal o gęstościach strumienia energii mikrofalowej powodujących ostry efekt termiczny.

2. Wykrywalne różnice w ilości wody w GSP, we krwi obwodowej i w nerkach, różnice przewodności właściwej w GSP i w nerce u szczurów poddanych hipertermii pod wpływem ciepła konwencjonalnego (40^o) i hipertermii pod wpływem pól e-m różnych przedziałów częstotliwości.

3. Większy spadek podziałów mitotycznych komórek nabłonka rogówki u kogutów, szczurów i królików poddanych działaniu mikrofal w okresie fazy spoczynkowej niż fazy aktywności w rytmie dobowym czuwania i wypoczynku.

4. Zmiany ilościowe hormonów gonadotropowych (FSH i LH9) w przysadce szczurów poddanych działaniu pól e-m, tj. zwiększenie ilości hormonów po krótkim okresie działania pól e-m i zmniejszenie ilości tych hormonów po długotrwałym powtarzanym działaniu pól e-m. Nie obserwowano tak regularnych zmian ilości hormonu wzrostu (GH) w przysadce zwierząt poddanych działaniu pól.

5. Progowa gęstość mocy pochłanianej (SAR) wynosiła 4,3 W/kg w ekspozycji ostrej i 2,5 W/kg w doświadczeniach przewlekłych z powtarzaną ekspozycją w polu mikrofal dla spowodowania zwiększenia ilości wody, zmiany ilości Na^+ , K^+ i Ca^{++} oraz zmiany przewodności właściwej w GSP. Powyżej tej progowej wartości mocy pochłanianej w ekspozycji ostrej w polach mikrofalowych występuje liniowa zależność wymienionych parametrów od mocy pochłanianej w W/kg. Na tej podstawie uznano, że GSP może stanowić narząd modelowy do badania wpływu pól e-m [Mikołajczyk, 1981].

6. Istotne nasilenie się zmian biologicznych pod wpływem złożonych i kombinowanych pól e-m w porównaniu ze zmianami powstającymi pod wpływem prostych pól e-m.

7. Porównywalne zmiany badanych parametrów biologicznych u szczurów poddanych działaniu pola E i pola H tej samej częstości (10 kHz i 45 kHz), ale o natężeniach różniących się o dwa rzędy wielkości (E:H) świadczące o tym, że składowa H pola e-m wywiera silniejsze działanie biologiczne niż składowa E pola. Ma to istotne znaczenie w ustalaniu dopuszczalnych natężeń pól e-m.

8. We wszystkich dotychczasowych badaniach doświadczalnych wykonywano preparaty histologiczne z krezki jelita cienkiego badanych zwierząt, w których stwierdzono zmiany wielkości i kształtu komórek tucznych pod wpływem pól e-m.

9. Stwierdzono dyskretne zmiany w stanie zdrowia pracowników stacji radiowych i telewizyjnych, ale bez swoistego zespołu tych zmian.

10. U pracowników zatrudnionych w narażeniu na pola e-m 2,4 – 10 kHz o natężeniach 1 – 60 V/m pola E i 1 – 430 A/m pola H obserwowano istotnie częściej stany zapalne górnych dróg oddechowych, ropne stany zapalne skóry rąk oraz częstsze dolegliwości subiektywne ze strony układu nerwowego i układu krążenia niż u pracowników wykonujących inne prace.

11. U operatorów monitorów ekranowych (stwarzających m.in. narażenie na szerokopasmowe pole e-m 1 kHz do 1 MHz o sumarycznym natężeniu 1 – 10 V/m), zatrudnionych w okresie ciąży przy monitorach, stwierdzono istotnie większe ryzyko poronienia samoistnego niż u urzędniczek nie używających monitorów ekranowych.

12. U samic szczurów ciężarnych poddanych działaniu pola e-m odbiorników telewizyjnych stwierdzono zwiększone ryzyko obumarcia i zmniejszenia ciężaru płodów, a u samców szczurów ryzyko zmniejszenia ciężaru gonad.

13. U szczurów trzymanyh po kilka godzin dziennie przez 30 dni w bezpośredniej bliskości (40 cm) ekranu monitora wyświetlającego obliczanie funkcji trygonometrycznych według programu pętlowego stwierdzono: przyspieszenie tempa wzrastania samców, zmniejszenie ciężaru przysadki u samic i samców, zwiększe-

nie ilości RNA w przysadce samic i samców, zmniejszenie ciężaru nadnerczy u samic i samców. W doświadczeniach tych kontrolowano ściśle warunki występowania pola e-m 50 Hz.

14. U szczurów samców poddawanych powtarzanemu działaniu pola E lub H o częstotściach 8 – 45 kHz poza wymienionymi powyżej zmianami stwierdzono pewne ilościowe zmiany DNA w przysadce w porównaniu z ilością DNA w przysadce zwierząt kontrolnych. Większość wymienionych powyżej wyników badań była przedmiotem publikacji [Mikołajczyk, 1974, 1978, 1979, 1981, 1984, 1986], natomiast wyniki podane w tabelach 14, 15, 16, 17, 18 oraz wyniki oznaczeń DNA i RNA pochodzą z badań wykonanych w ramach tego tematu, chociaż część materiału biologicznego pochodziła od zwierząt użytych do doświadczeń w innych tematach badawczych. Przedstawiona problematyka stałych, wolnozmiennych i szybkozmiennych pól e-m wskazuje na to, że badania zmierzające do wykazania mechanizmów nietermicznych wpływów pól e-m cechowały się kolejnymi kryzysami metodologiczno-koncepcyjnymi. Utrzymuje się zgodność poglądów w sprawie termicznych efektów pól e-m. Enigmatyczne pozostają nadal mechanizmy powstawania dyskretnych zmian biologicznych pod wpływem słabych pól e-m.

Działanie biologiczne stałych, wolnozmiennych i szybkozmiennych pól e-m o słabych i bardzo słabych natężeniach odnosi się do tych samych elementów żywego ustroju, ale stosowanie tych pól w doświadczeniach pozwala niezwykle rzadko otrzymać porównywalne wyniki. Przemawia to za prawdopodobieństwem tez podanych w początkowej części tego opracowania i za przedstawioną koncepcją działania pól e-m, na co zwrócono uwagę wcześniej w fachowym piśmiennictwie [Pettig i Kell, 1987].

Energia działającego pola e-m może w niezmiennionej postaci przepływać w przestrzeniach międzykomórkowych, ponosząc stosunkowo niewielkie straty ze względu na bardzo mały opór. Przez bezosłonkowe włókna nerwowe, przez złącza elektrotoniczne w momencie ich otwierania i zamykania, przez najmniejsze naczynia krwionośne i przez rozmaite "nieszczelności" błon komórkowych energia pól e-m może wnikać do komórek i dalej przepływać do innych komórek przez otwarte złącza elektrotoniczne. Tak dzieje się w przypadku słabych pól e-m, których obecność w komórkach może łatwo zakłócić normalne fizjologiczne przebiegi energetyczne. W przypadku silnych pól e-m dochodzi do przeciążenia "energetycznego" w przestrzeniach międzykomórkowych, co powoduje natychmiast zamykanie złącz elektrotonicznych i dzięki wielkiemu oporowi błon komórkowych energia e-m nie może przepływać z komórki do komórki, co eliminuje efekt pól e-m.

23. DOPUSZCZALNE NATĘŻENIA PÓL E-M (NDN)

Od czasu skonstruowania i wykorzystywania urządzeń generujących silne pola e-m powstały obawy o stan zdrowia osób zatrudnionych przy tych urządzeniach. Znany był już wówczas efekt termiczny w wyniku pochłaniania i zamiany na ciepło energii e-m. Konsekwentnie do tego faktu realną podstawą określenia dopuszczalnych natężeń pól e-m była dążność do ograniczenia efektu termicznego i dopiero



w dalszej kolejności uwzględniano domniemane działania nietermiczne pól e-m. W miarę rozwijania badań doświadczalnych dotyczących wpływu pól e-m na obiekty biologiczne zdobywano nowe wyniki wskazujące na nietermiczne działania pól e-m, ale jednocześnie pojawiały się rozmaite zastrzeżenia natury metodycznej w realizowaniu publikowanych badań. Chodziło zwłaszcza o niedostateczne przywiązywanie wagi do prawidłowo przeprowadzanych równoległych badań kontrolnych i do mało obiektywnych obliczeń statystycznych. Takie zastrzeżenia wysuwano również i wówczas, gdy nie udawało się powtórzenie badań doświadczalnych uprzednio opublikowanych. Takie trudności natury biologicznej w ocenie działania pól e-m stworzyły zapotrzebowanie na rozwijanie modelowych obliczeń rachunkowych analizujących relacje parametrów fizycznych pól e-m do parametrów biofizycznych i anatomicznych badanych obiektów biologicznych, a zwłaszcza odnoszących się do człowieka. Badania takie doprowadziły do ustalenia pewnych prawidłowości w pochłanianiu energii pól e-m przez obiekty biologiczne w zależności od wymienionych powyżej relacji. Na tej drodze określono częstotliwości rezonansowe wynikające z długości fal promieniowania e-m i wymiarów metrycznych ciała człowieka i jego członów. Stało się oczywistym, że energia e-m o słabym natężeniu może w razie rezonansowego pochłaniania powodować istotny efekt termiczny w części organizmu lub w całym organizmie.

23.1. Standard GOST 12.1.006-08

Istniejące dopuszczalne natężenia pól e-m są okresowo weryfikowane i modyfikowane w miarę gromadzenia wyników badań doświadczalnych i klinicznych w warunkach działania pól e-m. Dobitym przykładem jest "ewolucja" dopuszczalnych natężeń pól e-m w ZSRR. W wyniku kilkuletnich badań higienicznych, biologicznych i klinicznych przeprowadzono weryfikację standardu GOST 12.1.006-76 "Pola elektromagnetyczne częstotliwości radiowych — ogólne wymagania bezpieczeństwa". Z dniem 1 stycznia 1982 r. wydano do tego standardu uzupełnienie pod nazwą "Zmiany nr 1", które zostały opracowane na podstawie wytycznych przedstawionych przez Instytut Higieny Pracy i Chorób Zawodowych Akademii Nauk Medycznych ZSRR w Moskwie. Zmiany te dotyczą zasad normowania dopuszczalnych wielkości pól e-m zakresu mikrofalowego [Sawin i współaut., 1983]. Wymienieni autorzy podkreślili, że w ponad 23-letnim okresie stosowania standardu nastąpiły istotne osiągnięcia badawcze, co wymagało zrewidowania tego standardu. Weryfikację tego standardu oparto na wynikach badań kliniczno-higienicznych u 1015 pracowników w 10 zakładach przemysłu elektronicznego i radiowego oraz na wynikach obszernych i ściśle kontrolowanych badań doświadczalnych. Następnie w 1984 r. zredagowano końcową wersję standardu, który z oznaczeniem GOST 12.1.006-08 "Pola elektromagnetyczne częstotliwości radiowych — dopuszczalne natężenia na stanowiskach pracy i wymagania przeprowadzania badań kontrolnych" obowiązuje w okresie 1986 01 01 — 1991 01 01.

Badania kliniczno-higieniczne u 1015 pracowników wykazały:

1. U pracowników ze stażem pracy 15 — 20 lat w przemyśle elektronicznym, gdzie gęstości strumienia energii nie przewyższały z reguły $10 - 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, nie stwierdzono istotnych zmian w stanie zdrowia.

2. U 2,6% badanych pracowników zakładów radiowych stwierdzono zmiany w stanie zdrowia, które mogły być związane z narażeniem na pola mikrofalowe. We wszystkich tych przypadkach chodziło o specjalistów ze stażem ponad 15-letnim narażonych w przeszłości na mikrofałę znacznych gęstości strumienia energii, tj. do 10 mW/cm^2 i więcej.

3. U pracowników ze stażem pracy do 15 lat, tj. zatrudnionych po wprowadzeniu środków ochronnych i podlegających narażeniu na mikrofałę o gęstościach mocy rzędu setek $\mu\text{W/cm}^2$, nie stwierdzono chorób zawodowych.

4. Wśród zbadanych pracowników w 27% przypadków wykazano zmiany czynnościowe w postaci dystonii wegetatywnej typu nadciśnieniowego. Nie wykazano istotnych różnic w częstotliwości i nasileniu takich zmian wśród specjalistów wykonujących regulację aparatury radiowej różnych typów i podlegających działaniu mikrofal o różnych gęstościach strumienia energii i w różnych okresach pracy. Na tej podstawie przypuszczano, że w etiopatogenezie dystonii istotne znaczenie mogą mieć inne niekorzystne czynniki środowiskowe (wysoka temperatura powietrza, hałas, napięcia psychoemocjonalne i inne). Zdaniem wymienionych autorów radzieckich przeprowadzone wyniki badań kliniczno-higienicznych potwierdziły zasadność obowiązujących NDN dla zakresu mikrofal.

Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu skorygowanie NDN mikrofal z uwagi na zależność pomiędzy gęstością strumienia energii i czasem działania mikrofal. Badania wykonano z zastosowaniem mikrofal o 10 cm długości fali i 9 różnych gęstościach strumienia energii w przedziale $0,25 - 10 \text{ mW/cm}^2$ działających w czasie od 6 minut do 4 godzin. Większość tych badań kontynuowano przez 4 miesiące. Ogółem badania wykonano na 1160 królikach, szczurach i myszach, oceniając zmiany w następujących układach: a) ośrodkowym układzie nerwowym (EEG, odruchy warunkowe, zmiany histologiczne), b) układzie neurohormonalnym (pomiar hormonów nadnerczy, ocena ciężaru gruczołów dokrewnych i zmiany histologiczne), c) układzie nieswoistej i swoistej odporności immunologicznej (ocena obrazu morfologicznego krwi, testy immunologiczne), d) funkcje generatywne (pomiar ciężaru gruczołów rozrodczych, zmiany histologiczne, płodność samic i samców). Wzajemne porównanie dwóch badanych parametrów, tj. gęstości strumienia energii i czasu działania I, oceniano przez porównanie efektów biologicznych działania mikrofal przy zachowaniu równości iloczynu gęstości strumienia energii i czasu ekspozycji. Iloczynowa wielkość $240 \text{ mW} \times \text{min/cm}^2$ według wymienionej zależności wynosiła:

1 mW/cm^2	przez 240 minut	
4 mW/cm^2	" 60 "	$240 \text{ mW} \times \text{min/cm}^2$
10 mW/cm^2	" 24 "	

Iloczynowa wielkość $60 \text{ mW} \times \text{min/cm}^2$ w podobnych warunkach wynosiła:

$250 \mu\text{W/cm}^2$	przez 240 minut	
$500 \mu\text{W/cm}^2$	" 120 "	
1 mW/cm^2	" 60 "	$60 \text{ mW} \times \text{min/cm}^2$
10 mW/cm^2	" 6 "	

Wyniki badań doświadczalnych wykazały wyraźną zależność efektów biologicznych od gęstości strumienia energii. Potwierdzono wyraźne biologiczne działanie mikrofal o 4 mW/cm^2 , a zwłaszcza o 10 mW/cm^2 . Stwierdzono zmiany czynnościowe w ośrodkowym układzie nerwowym, w układzie wewnątrzwydzielniczym (hormonalnym), zmiany odczynów immunologicznych i inne. Wszystkie te zmiany występowały od wczesnych okresów działania mikrofal, były stabilne i miały charakter kumulacyjny. Dla mniejszych gęstości strumienia energii, tj. 1 mW/cm^2 , stwierdzono słabsze biologiczne działanie mikrofal i zmiany obserwowano tylko w zakresie niektórych badanych parametrów. Pod wpływem gęstości strumienia energii $250 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ przez 4 godziny dziennie w ciągu 4 miesięcy stwierdzono nieznaczne zmiany czynnościowe w niektórych układach, cechujące się odczynami adaptacyjnymi. Porównanie efektów działania różnych wielkości energetycznych wykazało:

a) nieliniową zależność pomiędzy efektem biologicznym i gęstością strumienia energii, tj. $4 - 10 \text{ mW/cm}^2$;

b) praktycznie liniową zależność efektu biologicznego od gęstości strumienia energii w przypadku mniejszych gęstości strumienia energii od 4 mW/cm^2 .

Przedstawione wyniki pozwoliły wnioskować, że miarą napromieniania w przypadku małych gęstości strumienia energii może być wielkość obciążenia energetycznego W dla organizmu, wyrażona iloczynem gęstości strumienia energii P i czasu T działania mikrofal w strefie napromieniania, tj. $W = P \times T$. Zgodnie z przedstawionymi powyżej uzasadnieniami Standard ZSRR, GOST 12.1.006-84 zawiera następujące NDN:

1) w przedziale $60 \text{ kHz} - 300 \text{ MHz}$:

a) dla składowej E :

		Czas narażenia dziennie	
		do 8 godz.	do 4 godz.
w zakresie	$60 \text{ kHz} - 3 \text{ MHz}$	50 V/m	100 V/m
"	$3 - 30 \text{ MHz}$	20 V/m	40 V/m
"	$30 - 50 \text{ MHz}$	10 V/m	20 V/m
"	$50 - 300 \text{ MHz}$	5 V/m	10 V/m

b) dla składowej H :

w zakresie	$60 \text{ kHz} - 1,5 \text{ MHz}$	5 A/m	10 A/m
"	$30 - 50 \text{ MHz}$	$0,3 \text{ A/m}$	$0,6 \text{ A/m}$

2) w przedziale $300 \text{ MHz} - 300 \text{ GHz}$ NDN gęstości strumienia energii należy określać na podstawie dopuszczalnego obciążenia energetycznego w funkcji czasu narażenia wg wyrażenia

$$P_{\text{dop}} = \frac{DE_{\text{NDN}}}{T},$$

gdzie: P_{dop} – dopuszczalna gęstość strumienia energii w W/m^2 , mW/cm^2 lub $\mu\text{W/cm}^2$,
 DE_{NDN} – dopuszczalne obciążenie energetyczne w ciągu dnia pracy wynoszące: a) $2 \text{ W} \times \text{godz.}/\text{m}^2$, czyli $200 \mu\text{W} \times \text{godz.}/\text{cm}^2$, w odniesieniu do wszystkich rodzajów napromieniania z wyłączeniem anten obro-



towych i skaningowych; b) $20 \text{ W} \times \text{godz./m}^2$, czyli $2000 \mu\text{W} \times \text{godz./cm}^2$, w odniesieniu do napromieniania od anten obrotowych i skaningowych o częstotliwości obrotów lub skaningowania do 1 Hz i wypełnieniu do 50, T – czas przebywania w strefie napromieniania w ciągu zmiany roboczej w godzinach (bez uwzględnienia reżimu obracania się i skaningowania anten).

Maksymalna wartość P_{dop} nie może przekraczać 10 W/m^2 , czyli $1000 \mu\text{W/cm}^2$.

Standard nakazuje wykonanie pomiarów co najmniej raz w roku w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Pomiary można wykonywać rzadziej, gdy nominalna moc urządzeń nie przekracza $2,5 \text{ W}$ w przedziale 60 kHz – 3 MHz, 400 mW w przedziale 3 – 30 MHz, 100 mW w przedziale 30 – 50 MHz, 25 mW w przedziale 50 – 300 MHz i 100 mW w przedziale 300 MHz – 300 GHz. Podano także odpowiednie wzory do obliczeń sumarycznego natężenia pól E i H z kilku źródeł oraz obliczenia wskaźnika dopuszczalności natężeń w przypadku jednoczesnego działania pól e-m z różnych przedziałów częstotliwości normowanych. Z dopuszczalnych natężeń pola E i pola H wynika, że równoważna impedancja tych pól wynosi 10 w przedziale 60 kHz – 3 MHz i 30 w przedziale 30 – 50 MHz.

23.2. Standard USA, ANSI C95.1-1982

Standard USA, ANSI C95.1-1982 "Safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields 300 kHz to 100 GHz", wprowadzono na miejsce ustanowionego przed 25 laty i adaptowanego w wielu krajach zachodnich tzw. standardu 10 mW/cm^2 uznającego tę gęstość strumienia energii za bezpieczną w przedziale częstotliwości 10 MHz – 100 GHz. Nowy standard podaje jednakowe wartości pól e-m w odniesieniu do ekspozycji zawodowej i pozazawodowej. Został on skomentowany w referatach podczas EMC Sympozjum w Zurychu w 1983 r. [Mitchell, 1983; Weiss, 1983]. Nie jest to standard w sensie dokumentu obowiązującego, lecz stanowi wytyczne do postępowania w celu ochrony przed promieniowaniem niejonizującym. Najważniejszymi podstawami nowego standardu są:

1. Jednomysłność w sprawie progowych natężeń pól e-m powodujących niekorzystne zmiany. W przeważającej większości badań biologicznych uzyskiwano mierzalne efekty termiczne pod wpływem średniej gęstości mocy padającej powyżej 2 mW/cm^2 . Po sprowadzeniu podawanych wielkości gęstości strumienia energii do wspólnej wielkości wyrażającej pochłanianie mocy określono, że progowa wielkość pochłaniania mocy do wywołania wykrywalnych zmian biologicznych wynosi 4 W/kg .

2. Ustalono także, że pochłanianie energii e-m w układach biologicznych zależy od częstotliwości pól e-m. Na podstawie wielu obliczeń teoretycznych i badań doświadczalnych wykazano, że średnie pochłanianie mocy przez cały organizm jest zależne od częstotliwości pól e-m. Jeśli przebieg wektora E staje się równoległy do długiej osi organizmu, wynoszącej $4/10$ długości fali padającej, to pochłanianie mocy osiąga wartość maksymalną. Dopuszczalne wartości pól e-m w nowym stan-

dardzie uwzględniają rozmaite wymiary organizmu człowieka, poczynawszy od dzieci do osób dorosłych. Na przykład organizm "standardowego" mężczyzny wzrostu 175 cm i masy 70 kg pochłania najwięcej energii e-m w polu 70 MHz, jeżeli wektor E ma układ równoległy do długiej osi organizmu. Ze względu na możliwość rezonansowego pochłaniania energii e-m w zakresie 30 – 300 MHz przez rozmaitych rozmiarów organizm ludzki, dla tego zakresu częstotliwości ustalono najniższe dopuszczalne wartości pól e-m, natomiast dla mniejszych i większych częstotliwości pól e-m dopuszczalne wartości są bardziej liberalne.

3. Średnią moc pochłanianą przez całe ciało człowieka ograniczono do 0,4 W/kg lub mniej w każdym dowolnym okresie 6 minut. Jak wspomniano powyżej, uzyskano pełną jednomyslność poglądów, że pochłanianie mocy 4 W/kg stanowi progową wartość energii e-m do spowodowania wykrywalnych niekorzystnych zmian biologicznych. W odniesieniu do tej wartości przyjęto współczynnik bezpieczeństwa 10 i otrzymano dopuszczalną wartość 0,4 W/kg jako średnie pochłanianie mocy przez cały organizm człowieka. Wartość ta odpowiada pochłanianiu około 144 J/kg w ciągu 0,1 godziny. W przypadku złożonych lub szerokopasmowych pól e-m zawierających wiele częstotliwości, mieszczących się w różnych przedziałach częstotliwości normowanych, standard nakazuje określić dla każdego takiego zakresu stosunek wartości zmierzonej do wartości dopuszczalnej; suma wszystkich stosunków nie powinna przekroczyć 1, czyli

$$\frac{E_1}{E_d} + \frac{E_2}{E_d} + \frac{E_n}{E_d} \leq 1.$$

Powyższa zasada jest analogiczna do tej, jaką stosuje się w odniesieniu do mieszanin substancji toksycznych o działaniu addytywnym na ten sam narząd oraz w odniesieniu do hałasu o różnych poziomach w poszczególnych okresach dnia pracy. Omawiany standard obejmuje wprowadzić przedział powyżej 0,3 MHz, ale w uzasadnieniu podano komentarz odnoszący się do pól e-m niższych częstotliwości. W miarę zmniejszania się częstotliwości poniżej 30 MHz zmniejsza się istotnie ilość energii e-m pochłanianej przez organizm ludzki. Tym niemniej zaleca się, ażeby natężenia pól e-m poniżej 3 MHz ograniczyć do natężeń typowych o równoważnej gęstości strumienia energii w fali płaskiej, tj. do 100 mW/cm². Ograniczenie to ma na celu zapobieganie występowaniu odczynów na powierzchni ciała w przypadku pól E o dużych natężeniach. Ograniczenie tempa pochłaniania energii do 0,4 W/kg przewidziano w odniesieniu do obiektu biologicznego znajdującego się w polu spolaryzowanej liniowo fali płaskiej, tj. w przypadku, gdy oś długa ciała jest równoległa do wektora E pola e-m. Taki przypadek zakłada maksymalne pochłanianie energii e-m. Uznano, że założenie o narażeniu na falę płaską jest uproszczeniem i nie jest realistycznym przybliżeniem większości narażeń stwarzających ryzyko dla zdrowia. Takie narażenie występuje we względnie bliskim sąsiedztwie źródeł pól e-m, ale ze względu na zlokalizowany charakter pól e-m w strefie bliskiej związane z tymi polami średnie ogólnoustrojowe pochłanianie energii (SAR) będzie mniejsze od wartości indukowanej przez falę płaską porównywalnych natężeń pola e-m. W przytoczonym powyżej komentarzu znajduje się "uzasadnienie"

stosowania równoważnej impedancji falowej wynoszącej 377Ω w całym normowanym przedziale częstotliwości 0,3 – 100 000 MHz pól e-m. Według omawianego standardu ANSI/82 należy mierzyć, tak dla fal ciągłych, jak i impulsowych, gęstość strumienia energii, wartości kwadratów natężeń pól E i H oraz pochłanianie mocy lub moc wejściową jako wartości średnie w dowolnym okresie 0,1 godziny i te średnie wartości nie powinny przekraczać wielkości podanych w poniższym zestawieniu.

Wytyczne ochrony przed promieniowaniem częstotliwości radiowej

Przedział częstotliwości MHz	E^2 V^2/m^2	H^2 A^2/m^2	Gęstość strumienia energii mW/cm^2
0,3 – 3	400000	2,5	100
3 – 30	$4000 : 900/f^2$	$0,025 : 900/f^2$	$900 : f^2$
30 – 300	4000	0,025	1,0
300 – 1500	$4000 : f/300$	$0,025 : f/300$	$f : 300$
1500 – 100000	20000	0,125	5,0

f – częstotliwość w MHz

Wprowadzie we wstępie do standardu ANSI/82 podano, że może on być stosowany tak do narażenia zawodowego, jak i pozazawodowego, ale nie ma wytycznych w sprawie dopuszczalnych wartości pól e-m w odniesieniu do ogółu ludności. Jednakże niezależnie od tego standardu w kilku stanach USA opracowano nieco odmiennie wytyczne w sprawie dopuszczalnych wartości pól e-m, ale we wszystkich tych wytycznych utrzymana jest podstawowa wartość dopuszczalna 0,4 W/kg pochłaniania mocy. W stanie Massachusetts podano w wytycznych także dopuszczalne wartości pól e-m w odniesieniu do ogółu ludności. Utrzymano tutaj również tę samą zależność dopuszczalnych wartości pól e-m od częstotliwości, ale dopuszczalną wartość w odniesieniu do ludności obniżono jeszcze 5-krotnie przy uśrednianiu w ciągu dowolnego okresu 30 minut. Tak więc dopuszczalne średnie pochłanianie mocy przez cały organizm w odniesieniu do ogółu ludności wynosi 0,08 W/kg w ciągu dowolnego okresu 30 minut.

23.3. Standard RFN, DIN/57848

Standard RFN, DIN/57848 Teil 1 und 2, wydany w roku 1982 (Teil 1) i w 1984 (Teil 2) należy do najnowszych ustaleń krajowych NDN pól elektromagnetycznych i obejmuje przedział od 10 kHz do 3000 GHz. Ta górna granica przedziału obejmuje częstotliwości o rząd większe niż w innych znanych standardach obejmujących częstotliwości do 300 GHz. Prawdopodobnie w standardzie DIN/57848 uwzględnione zostały częstotliwości przydzielone do celów łączności satelitarnej w pasmach powyżej 300 GHz [ITU, 1982]. Standard ten w części 1 podaje zasadnicze definicje, z których kilka zamieszczamy poniżej (w nawiasach podano numer terminu wg standardu DIN):

- pole e-m (2.1) - zmieniające się w przestrzeni i czasie pole, które można opisać natężeniem pól magnetycznego i elektrycznego i które rozprzestrzenia się od źródła (np. anteny);

- natężenie pola elektrycznego (2.2) - składowy wektor elektryczny E pola e-m o określonym zwrocie w przestrzeni, V/m;

- natężenie pola magnetycznego (2.3) - składowy wektor magnetyczny H pola e-m o określonym zwrocie w przestrzeni, A/m;

- natężenie pola elektrycznego wypadkowego (2.4 - Ersatzfeldstärke) - wektor natężenia pola E w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach przestrzeni bez uwzględnienia wzajemnych różnic fazowych, $\vec{E}_e$ w V/m;

- natężenie pola magnetycznego wypadkowego (2.5) - wektor natężenia pola H w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach przestrzeni bez uwzględnienia wzajemnych różnic fazowych, $\vec{H}_e$ w A/m. Pomiar natężeń pola elektrycznego wypadkowego E_e i pola magnetycznego wypadkowego H_e - z pomiarów natężenia pól E lub H we wzajemnie prostopadłych trzech kierunkach przestrzeni obliczyć sumę natężenia pola elektrycznego wypadkowego E_e i pola magnetycznego wypadkowego H_e według wyrażen

$$E_e = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad H_e = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$

Nie uwzględnione są tutaj wzajemne różnice fazowe pól E i H . Wartość graniczna oznacza największą lub najmniejszą wartość jakiejś wielkości zawartej w ustaleniu. Przy przekroczeniu ustalonej w tym standardzie wartości granicznej jako największej dopuszczalnej wartości może wystąpić zagrożenie ludzi. Wartości graniczne bezpośredniego zagrożenia ludzi przez pola e-m podane zostały w zestawieniu (tab. 19). W przedziale 10 - 30 kHz miernikiem narażenia osób są wartości szczytowe pól E i H . W przypadku narażenia ramion i nóg nie dłużej niż 5 minut w każdej godzinie dopuszczalna jest wartość szczytowa pola H do 5 kA/m. W odniesieniu do innych przedziałów częstotliwości pól e-m ustalono graniczne dopuszczalne wartości natężeń pól E_e i H_e oraz średniej gęstości strumienia energii S_a dla narażenia trwającego dłużej niż 6 minut, a dla narażenia trwającego krócej podano odpowiednie wyrażenia służące do obliczenia dopuszczalnych natężeń pól E_e i H_e oraz średniej gęstości strumienia energii S_a .

W omawianym standardzie nie podano dokumentacji NDN ani podstaw ich ustalenia. Oczywiście, że podane wartości NDN ustalone zostały na podstawie obliczeń teoretycznych wielkości prądów indukowanych w organizmie człowieka, zwłaszcza pod wpływem pól e-m małych częstotliwości. Wynika z tego, że dopuszczalne są bardzo duże natężenia pól E i H w krótkim (chwilowym) okresie narażenia. Chodzi tutaj przede wszystkim o narażenie na niestałych stanowiskach pracy. Takie stanowiska pracy są typowe przy nagrzewnicach indukcyjnych średniej częstotliwości.

Wartości liczbowe i wytyczne obliczania dopuszczalnych natężeń
pól e-m w Standardzie DIN 57848 Teil 1 i 2

Przedział częstości pól e-m	Wartości E_e , H_e , S_a dla czasu 6 min	Uwagi i wartości członu K * w równaniach dla czasu 6 min
$30 \text{ kHz} \leq f < 30 \text{ kHz}$	E_e 1500 V/m (2000) H_e 350 A/m (500)	W przypadku narażenia rąk i nóg w czasie do 5 min dopusz- czalne jest H_e do 5 kA/min. W nawiasach wartości szczyto- we natężenia
$30 \text{ kHz} \leq f < 2 \text{ MHz}$	E_e 1500 V/m H_e $7,5 : f$ A/m	K $1,35 \times 10^7 (V/m)^2 \times \text{min}$ K $337,5 : f^2 (A/m)^2 \times \text{min}$
$2 \text{ MHz} \leq f < 30 \text{ MHz}$	E_e $3000 : f$ V/m H_e $7,5 : f$ A/m	K $5,4 \times 10^7 (V/m)^2 \times \text{min}$ K $337,5 : f^2 (A/m)^2 \times \text{min}$
$30 \text{ MHz} \leq f < 3 \text{ GHz}$	E_e 100 V/m H_e 0,25 A/m S_a 25 W/m ²	K $6 \times 10^4 (V/m)^2 \times \text{min}$ K $0,375 (A/m)^2 \times \text{min}$ K $150 W/m^2 \times \text{min}$
$3 \text{ GHz} \leq f < 12 \text{ GHz}$	E_e $100 \times f : 3000$ V/m H_e $0,25 \times f : 3000$ V/m S_a 25 W/m ²	K $20 \times f (V/m)^2 \times \text{min}$ K $1,25 \times 10^4 \times f (A/m)^2 \times \text{min}$ K $0,05 \times f W/m^2 \times \text{min}$
$12 \text{ GHz} \leq f < 3000 \text{ GHz}$	E_e 200 V/m H_e 0,5 A/m S_a 100 W/m ²	K $2,4 \times 10^5 (V/m)^2 \times \text{min}$ K $1,5 (A/m)^2 \times \text{min}$ K $600 W/m^2 \times \text{min}$

* Podane człony K wstawia się do następujących wzorów:

$$\sum_{i=n}^n E_i^2 \times t_i \leq K; \quad \sum_{i=n}^n H_i^2 \times t_i \leq K; \quad \sum_{i=n}^n S_i \times t_i \leq K,$$

gdzie: E_i , H_i – wartości skuteczne wypadkowych natężeń pól w i-tym czasie na-
rażenia (w V/m lub A/m),

S_a – średnia gęstość strumienia energii w i-tym czasie narażenia
(w W/m²),

t_i – i-ty czas narażenia (w min),

f – częstość w MHz,

n – liczba narażeń w ciągu jednego 6-minutowego okresu.

23.4. Wytyczne ACGIH

Wytyczne ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) do stosowania na lata 1986-1987 były obowiązujące w odniesieniu do narażenia zawodowego. Ustalone wartości pól e-m zaczerpnięto ze standardu ANSI C95.1-1982 i będą one najprawdopodobniej obowiązywać w latach następnych. Dopuszczalne wartości natężeń pól e-m przedstawione są w poniższym zestawieniu.

Przedział częstotści	Gęstość strumienia energii (mW/cm ²)	Kwadrat natężenia pola E (V ² /m ²)	Kwadrat natężenia pola H (A ² /m ²)
10 kHz — 3 MHz	100	377000	2,65
3 — 30 MHz	900/f ²	3770 x 900/f ²	900/(37,7 x f ²)
30 — 100 MHz	1	3770	0,027
100 — 1000 MHz	f/100	3770 x f/100	f/37,7 x 100
1 — 300 GHz	10	37700	0,265

f = MHz

Podane w wytycznych ACGIH dopuszczalne wartości pól e-m wynikają z ograniczenia ogólnoustrojowego pochłaniania energii (SAR) do 0,4 W/kg w dowolnym okresie 0,1 godz. w przedziale 3 MHz — 300 GHz. Ograniczenie ogólnoustrojowego SAR w przedziale 10 kHz — 3 MHz także do 0,4 W/kg z dopuszczalną gęstością strumienia energii 100 mW/cm² ma na celu ochronę przed ryzykiem wstrząsu i oparzeń, jakie mogą powstawać w wyniku indukowanych prądów pod wpływem pól e-m tego przedziału częstotści. W wytycznych tych podano także zastrzeżenie, że w przypadku narażenia w polu bliskim nie można mierzyć bezpośrednio gęstości strumienia energii, ale należy obliczyć równoważną gęstość strumienia energii dla fali płaskiej z pomiaru natężenia pola E lub H według następujących wyrażeń

$$PD(mW/cm^2) = \frac{E^2}{3770} = 37,7 H^2,$$

gdzie: PD — gęstość strumienia energii,

E² — V²/m²,

H² — A²/m².

Podano zastrzeżenie, że tak obliczone wartości pól e-m winny służyć jako wytyczne do oceny i kontroli narażenia, ale nie można ich uważać za ścisłe wartości rozgraniczające wartości bezpieczne i niebezpieczne dla zdrowia. ACGIH nie podała dokumentacji przyjętego NDN, ale wiadomo, że jest on oparty na standardzie ANSI C95.1-1982, przy czym obniżono dolną granicę częstotści do 10 kHz, zachowując takie wartości, jakie przyjęto dla przedziału 0,3 — 3 MHz w standardzie ANSI C95.1-1982, oraz rozszerzono górną granicę częstotści do 300 GHz, zachowując takie wartości NDN, jakie przyjęto dla przedziału 1 — 100 GHz w standardzie ANSI. W obu powyższych dokumentach przyjęto za podstawę NDN pól e-m pochłania-

23.4. Wytyczne ACGIH

Wytyczne ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) do stosowania na lata 1986-1987 były obowiązujące w odniesieniu do narażenia zawodowego. Ustalone wartości pól e-m zaczerpnięto ze standardu ANSI C95.1-1982 i będą one najprawdopodobniej obowiązywać w latach następnych. Dopuszczalne wartości natężeń pól e-m przedstawione są w poniższym zestawieniu.

Przedział częstotści	Gęstość strumienia energii (mW/cm ²)	Kwadrat natężenia pola E (V ² /m ²)	Kwadrat natężenia pola H (A ² /m ²)
10 kHz — 3 MHz	100	377000	2,65
3 — 30 MHz	900/f ²	3770 x 900/f ²	900/(37,7 x f ²)
30 — 100 MHz	1	3770	0,027
100 — 1000 MHz	f/100	3770 x f/100	f/37,7 x 100
1 — 300 GHz	10	37700	0,265

f = MHz

Podane w wytycznych ACGIH dopuszczalne wartości pól e-m wynikają z ograniczenia ogólnoustrojowego pochłaniania energii (SAR) do 0,4 W/kg w dowolnym okresie 0,1 godz. w przedziale 3 MHz — 300 GHz. Ograniczenie ogólnoustrojowego SAR w przedziale 10 kHz — 3 MHz także do 0,4 W/kg z dopuszczalną gęstością strumienia energii 100 mW/cm² ma na celu ochronę przed ryzykiem wstrząsu i oparzeń, jakie mogą powstawać w wyniku indukowanych prądów pod wpływem pól e-m tego przedziału częstotści. W wytycznych tych podano także zastrzeżenie, że w przypadku narażenia w polu bliskim nie można mierzyć bezpośrednio gęstości strumienia energii, ale należy obliczyć równoważną gęstość strumienia energii dla fali płaskiej z pomiaru natężenia pola E lub H według następujących wyrażeń

$$PD(mW/cm^2) = \frac{E^2}{3770} = 37,7 H^2,$$

gdzie: PD — gęstość strumienia energii,

E^2 — V²/m²,

H^2 — A²/m².

Podano zastrzeżenie, że tak obliczone wartości pól e-m winny służyć jako wytyczne do oceny i kontroli narażenia, ale nie można ich uważać za ściśle wartości rozgraniczające wartości bezpieczne i niebezpieczne dla zdrowia. ACGIH nie podała dokumentacji przyjętego NDN, ale wiadomo, że jest on oparty na standardzie ANSI C95.1-1982, przy czym obniżono dolną granicę częstotści do 10 kHz, zachowując takie wartości, jakie przyjęto dla przedziału 0,3 — 3 MHz w standardzie ANSI C95.1-1982, oraz rozszerzono górną granicę częstotści do 300 GHz, zachowując takie wartości NDN, jakie przyjęto dla przedziału 1 — 100 GHz w standardzie ANSI. W obu powyższych dokumentach przyjęto za podstawę NDN pól e-m pochłaniania

nie mocy 0,4 W/kg niezależnie od pasma częstotliwości normowanej. Ta wartość mocy pochłanianej wynika z wprowadzenia współczynnika 10 w stosunku do progowego pochłaniania mocy 4 W/kg powodującego wykrywalne zmiany biologiczne. Z podanych powyżej wartości dopuszczalnych widać, że do obliczenia relacji pola E do pola H przyjęto impedancję równoważną wolnej przestrzeni (fala płaska) wynoszącą 377Ω . Można sprawdzić, że w wytycznych ACGIH, podobnie jak w standardzie ANSI, najniższe dopuszczalne natężenia pola E i pola H ustalono w przedziale 30 – 100 MHz, w którym może występować rezonansowe pochłanianie energii e-m w organizmie człowieka. Podczas Międzynarodowej Konferencji ACGIH zorganizowanej w 1985 r. w siedzibie Europejskiego Biura Regionalnego WHO w Kopenhadze przedstawiciele Komitetu Czynniki Fizycznych ACGIH nie byli w stanie podać uzasadnienia stosowania impedancji równoważnej 377Ω w ustalaniu NDN pól e-m, zwłaszcza w przedziale małych i bardzo małych częstotliwości.

23.5. Standard RWPG, ST SEW 01.873.08-84

Standard RWPG, ST SEW 01.873.08-84, obejmuje przedział 60 kHz – 300 MHz pól e-m, przy czym ocenę narażenia przeprowadza się na podstawie natężeń pola E i pola H oraz wskaźnika energetycznego (W_E i W_H) wyrażającego kwadrat natężenia pola E lub pola H pomnożony przez czas T działania w ciągu dnia pracy, tj.

$$W_E = E^2 \times T = (V/m)^2 \times h$$

$$W_H = H^2 \times T = (A/m)^2 \times h.$$

Dopuszczalne natężenia pól E i H oraz wskaźników energetycznych przedstawia poniższe zestawienie.

Przedział częstotliwości MHz	Natężenia dopuszczalne w ciągu 0,1 h		Wskaźniki energetyczne	
	E V/m	H A/m	$W_E (V/m)^2 \times h$	$W_H (A/m)^2 \times h$
0,06 – 3	500	500	20000	200
3 – 30	200		3200	
30 – 300	80		800	

Dopuszczalne natężenia pola E i H w czasie krótszym niż 8 godz. dziennie wyznacza się ze wzorów

$$E_T \leq \sqrt{\frac{W_E(NDN)}{T}}$$

$$H_T \leq \sqrt{\frac{W_H(NDN)}{T}},$$

gdzie: E_T i H_T – dopuszczalne natężenia pola E w V/m i pola H w A/m w konkretnym czasie T narażenia.

W standardzie tym podano także graniczne wartości natężeń pól E i H, które wynikają z zaokrąglenia dopuszczalnych natężeń tych pól obliczonych dla 0,1 godz.

W komentarzu do tego standardu podano, że w przedziale częstości normowanych ustalono dopuszczalne wartości na podstawie NDN w normach ZSRR, Bułgarii, NRD i Czechosłowacji. Podane zaś graniczne wartości pola E i H ustalono na podstawie wyników badań przeprowadzonych w różnych latach w Instytucie Higieny Pracy i Chorób Zawodowych ANM ZSRR (Leningrad i Charków), w Wojskowej Akademii Medycznej im. Kirowa, w Instytucie Higieny i Epidemiologii i w Uniwersytecie im. Karola w Pradze, przy czym te graniczne wartości odnoszą się do 5–7 min działania pól e-m (dalsze skrócenie czasu działania nie miało praktycznego znaczenia, jak to podano w komentarzu). Standard RWPG został wykorzystany do ustalenia równoważnego standardu NRD, TGL 32602/01, wydanego w 1987 r., który jednak obejmuje i przedział powyżej 300 MHz.

Dopuszczalne natężenia pól e-m w Kanadzie od 1977 i 1978 r. poddane zostały ocenie krytycznej. Zaproponowano nowe graniczne natężenia pól e-m w odniesieniu do narażenia zawodowego i narażenia ogółu ludności [Stuchly, 1987]. Wprawdzie nie było wiadome, czy w tej formie publikacyjnej wytyczne zostaną przyjęte jako obowiązujące, ale ze względu na filozofię ich ustalenia zostaną one w skrócie przedstawione poniżej. Przede wszystkim przyjęto następujące warunki ustalenia NDN:

1. Średnie pochłanianie mocy (SAR) w dowolnej 0,2 części masy ciała nie może przekraczać 0,4 W/kg w przypadku narażenia zawodowego i 0,2 W/kg w przypadku narażenia niezawodowego.

2. Miejscowe pochłanianie mocy (SAR) w oku nie może przekraczać 0,4 W/kg w przypadku narażenia zawodowego i niezawodowego.

3. Miejscowe pochłanianie mocy (SAR) obliczone na dowolny gram tkanki nie może przekraczać 8 W/kg, z wyjątkiem powierzchni ciała lub kończyn (ręce i nogi), dla których graniczna wartość wynosi 25 W/kg w przypadku narażenia zawodowego, a w przypadku narażenia osób z ogółu ludności odpowiednie wartości wynoszą 4 i 12 W/kg.

4. Podane powyżej wartości graniczne należy uśredniać dla 0,1 godziny, tak w przypadku narażenia zawodowego, jak i narażenia niezawodowego.

Podano także graniczne wartości natężenia prądu w przypadku kontaktu pracowników i osób z ogółu ludności. Te propozycje dopuszczalnych natężeń pól e-m i natężeń prądu podano w tabeli 20. Podane propozycje kanadyjskie zawierają także informacje w sprawie przeprowadzania pomiarów pól e-m oraz zaniechania kontrolowania urządzeń ze względu na małą moc pracy (urządzenia na częstotliwość poniżej 1 GHz z mocą wyjściową poniżej 7 W).

23.6. Wytyczne IRPA/INIRC

Wytyczne w sprawie dopuszczalnych natężeń pól e-m od 0,1 MHz do 300 GHz przedstawione przez Międzynarodowy Komitet Promieniowania Niejonizującego działający przy Międzynarodowym Stowarzyszeniu Ochrony przed Promieniowaniem (IRPA/INIRC – International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association) są zweryfikowaną wersją wytycznych



Dopuszczalne natężenia pól e-m i natężenia prądu
według propozycji higienicznych normatywów kanadyjskich [Stuchly, 1987]

Częstość (MHz)	Narażenia zawodowe			Narażenia niezawodowe				
	pole E (rms) V/m	pole H (rms) A/m	gęstość mocy W/m ²	prąd mA	pole E (rms) V/m	pole H (rms) A/m	gęstość mocy W/m ²	prąd mA
0,01 – 0,1	-	-	-	40(10f) ^{0,7}	-	-	-	15(10f) ^{0,5}
0,1 – 100	-	-	-	40	-	-	-	15
0,01 – 1,2	600	4,0	-	-	280	1,8	-	-
1,2 – 3	600	4,8 : f	-	-	280	2,1 : f	-	-
3 – 30	$\frac{1800 : f}{3120 : f^{1,5}} *$	4,8 : f	-	-	$\frac{840 : f}{1600 : f^{1,5}} *$	2,1 : f	-	-
30 – 100	$\frac{60}{20} *$	0,16	-	-	$\frac{28}{10} *$	0,07 m	-	-
100 – 300	60 lub 0,2f	0,16	10	-	28 lub 0,1f	0,07	2	-
300 – 1500	3,45f ^{0,5}	0,0093f ^{0,5}	-	-	1,61f ^{0,5}	0,004f ^{0,5}	-	-
1500 – 300 000	140	0,36	50	-	60	0,16	10	-

*Mniejsze wartości podane pod kreską odnoszą się do osób znajdujących się w odległości mniejszej niż 0,1 m od elektrycznego uzienienia; we wszystkich innych przypadkach stosować wartości większe podane nad kreską.

z 1984 r. i zostały oparte głównie na ustaleniach dokumentacyjnych standardu ANSI/1982 [IRPA Guidelines, 1988]. Za podstawową wielkość graniczną narażenia na pola o częstotliwości powyżej 10 MHz przyjęto swoiste tempo pochłaniania (SAR – specific absorption rate) oznaczające pochłanianie mocy na jednostkę masy, W/kg. SAR może być uśrednione dla całej masy ciała lub jego części oraz w określonym czasie narażenia albo też dla czasu trwania pojedynczego impulsu (szerokość impulsu) i okresu modulacji pola e-m. Do celów praktycznych podano w wytycznych także wartości pochodne wyrażone gęstością strumienia energii padającej przy nieobecności obiektu w miejscu pomiaru. Gęstość strumienia energii oznacza w tych wytycznych moc promieniowania padającego na małą kulę, podzieloną przez powierzchnię przekroju tej kuli i wyrażoną w W/m^2 . W polu dalekim anteny lub promiennika wykorzystano zależności natężeń pól E i H oraz gęstości strumienia energii według wektora Poyntinga, S, będącego iloczynem wektorowym natężeń pól E i H. W polu bliskim, czyli w polu wielotorowym, należy mierzyć natężenie pola E i pola H, co się odnosi do większości sytuacji występowania pól e-m o częstotliwości poniżej 100 MHz. W polu bliskim występują złożone zależności fazowe pól E i H i dlatego wprowadzono koncepcję "gęstości mocy równoważnej dla fali płaskiej", P_{eq} , w W/m^2 . Przy częstotliwościach poniżej 10 MHz koncepcja SAR ma ograniczone znaczenie, gdyż efekty biologiczne w wyniku narażenia są bardziej uzależnione od gęstości prądu indukowanego w ustroju. W normowanych przedziałach częstotliwości poniżej 10 MHz podstawowe wartości graniczne wyrażono w pojęciach padającego "skutecznego natężenia pola elektrycznego, E_{eff} ", i "skutecznego natężenia pola magnetycznego, H_{eff} ". W polu bliskim nie są znane zależności fazowe składowych kierunkowych pola i skuteczne natężenie pola otrzymuje się przez dodanie kwadratów natężeń składowych pionowych i poziomych pola oraz wyciągnięcie z tak otrzymanej sumy pierwiastka kwadratowego. W zależności od czasu działania podaje się wartość średnią pierwiastka kwadratowego (rms – root mean square) składowej E w V/m i składowej H w A/m. Dopuszczalne wartości pól e-m odnoszące się do narażenia zawodowego i do narażenia ogółu ludności podano w tabeli 21. Kwadrat natężenia pola E i pola H jest wartością uśrednioną dla dowolnego okresu 6 min w czasie dnia pracy, pod warunkiem że prąd przepływający pomiędzy ciałem i podłożem uziemiającym nie przekracza 200 mA. Wyeliminowane zostało także ryzyko oparzenia prądem dużej częstotliwości (RF). Natężenia pola E lub H w impulsie uśrednione za czas trwania impulsu (szerokość impulsu) mogą być większe 32-krotnie niż wartości podane w tabeli 21. Narażenie zawodowe na pola e-m o częstotliwości powyżej 10 MHz nie powinno przekraczać SAR wynoszącego 0,4 W/kg jako wartości uśrednionej dla całego ciała w dowolnym okresie 6 min, z tym że w częściach dystalnych ciała (ręce, nadgarstki, stopy, kolana) wielkość ta nie może przekraczać 2 W/0,1 kg, a w pozostałych okolicach ciała 1 W/0,1 kg. Pochłanianie energii w sensie SAR można obliczyć na podstawie bezpośrednich pomiarów lub z natężeń pól E i H padających oraz odpowiednich parametrów ciała człowieka podanych w publikacjach Durneya i współaut. w roku 1978 i 1986. Dopuszczalne wartości szczytowe impulsów uśrednione za czas trwania impulsu nie mogą przekraczać 1000-krotnej wartości P_{eq} podanych w tabeli 21.

W przypadku pola bliskiego może dominować składowa E lub H. W takich sytuacjach dopuszczalne wartości podane w tabeli 21 w przedziale 10 – 30 MHz i niekiedy do 100 MHz można zwiększyć pod warunkiem wynikającym z wyrażenia

$$\frac{5}{6}(E^2/120\pi) + \frac{1}{6}(120\pi H^2) \leq P_{eq},$$

gdzie: E w V/m, H w A/m i P_{eq} w W/m² podane w tabeli 21.

Drugim warunkiem wymienionego zwiększenia natężeń pól E lub H jest nieprzekraczalność dopuszczalnej wartości SAR uśrednionego w dowolnym okresie 6 min. Dopuszczalne wartości pól e-m odnoszące się do ogółu ludności ustalono na podstawie granicznej wartości SAR, wynoszącej 0,08 W/kg po uśrednieniu w dowolnym okresie 6 min. Z przedstawionych uzasadnień wynika, że wytyczne IRPA/INIRC opierają się na ograniczeniu lub wyeliminowaniu powstania efektu termicznego pod wpływem pól e-m. Jest to więc takie samo kryterium jak w dokumentacji standardu ANSI/1982.

23.7. Charakterystyka istniejących przepisów i norm polskich

Obowiązujące w Polsce NDN pól e-m wydane zostały w formie odpowiednich rozporządzeń [1972, 1977, 1980, 1985], w ślad za którymi wydano szereg Polskich Norm dotyczących mianownictwa, aparatury pomiarowej i metod pomiarów oraz sporządzania orzeczeń. Za podstawę określenia dopuszczalnych natężeń pola E i H gęstości strumienia energii przyjęto zasadę stref ochronnych. Zgodnie z tą zasadą przyjęto jako graniczną wartość strefy bezpiecznej i strefy zagrożenia gęstość strumienia energii 0,1 W/m², tj. wartość dopuszczalną narażenia zawodowego w ciągu 8-godzinnego dnia pracy według ówczesnych norm sanitarnych ZSRR, natomiast jako graniczną wartość strefy zagrożenia i strefy niebezpiecznej – 100 W/m², tj. gęstość strumienia energii dopuszczalną według standardu ANSI/1974, przy czym ustalenia te odnosiły się do pól e-m przedziału mikrofalowego 300 MHz – 300 GHz. Wszystkie pozostałe wartości dopuszczalnych gęstości mocy i dopuszczalnych natężeń pola E i H w zakresie 0,1 – 300 MHz i 50 Hz przyjęte zostały arbitralnie, bez merytorycznej dokumentacji (tab. 22). Jednocześnie z przyjęciem przepisów o dopuszczalnych natężeniach pól e-m ustalono system organizacyjno-prawny do przeprowadzania kontrolnych pomiarów pól e-m, wydawania opinii o wielkości narażenia na pola e-m i warunków dopuszczalności pracy oraz szkolenia w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy pracowników zatrudnionych przy urządzeniach wytwarzających pola e-m. Niemal od początku obowiązywania i praktycznego stosowania wymienionych rozporządzeń niektórych Polskich Norm zostały ujawnione następujące niespójności i niedokładności [Mikołajczyk, 1980]. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 maja 1972 r. stwierdza w § 4.1.4: "W strefie niebezpiecznej przebywanie ludzi bez stosowania środków ochrony osobistej jest wzbronione". Rozporządzenie Ministrów Pracy, Płac i Spraw Socjalnych oraz Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 19 lutego 1977 r. stwierdza w § 6.1.4: "W strefie niebezpiecznej przebywanie pracowników jest zabronione". Natomiast

Przedziały częstotliwości	Parametr pomiaru	Ekspozycja zawodowa				Środowisko komunalne	
		strefa					
		zagrożenia	pośrednia	bezpieczna	I stopnia	II stopnia	
0 — 50 Hz	B T H A/m	-	-	-	-	-	-
50 Hz	E kV/m H A/m	-	-	-	10	1 — 10	
50 — 1000 Hz	E V/m H A/m	-	-	-	-	-	
1 — 100 kHz	E V/m HH A/m	-	-	-	-	-	
0,1 — 10 MHz	E V/m H A/m	70 — 1000 ^a 10 — 250 ^b	20 — 70 2 — 10	< 20 < 2	> 20	> 5 — 20	
10 — 300 MHz	E V/m	20 — 300 ^c	7 — 20	< 7	> 7	> 2 — 7	
300 — 300 000 MHz							
stacjonarne	P W/m ²	2 — 100 ^d	0,1 — 2	< 0,1	> 0,1	> 0,025 — 0,1	
niestacjonarne	P W/m ²	10 — 100 ^e	1 — 10	< 1,0	> 1,0	> 0,25 — 1,0	

Obliczenie dopuszczalnego czasu przebywania w strefach zagrożenia:

$$a - T_d = \frac{560}{E} \quad b - T_d = \frac{80}{H} \quad c - T_d = \frac{3200}{E^2} \quad d - T_d = \frac{32}{P^2} \quad e - T_d = \frac{800}{P}$$

T_d = czas w godzinach,

E — średnie natężenie pola E w V/m
H — średnie natężenie pola H w A/m
P — średnia gęstość strumienia energii w W/m²
B — indukcja magnetyczna w teslach

PN-77/T-01025 stwierdza w punkcie 4.(4.2): "Strefa niebezpieczna — strefa ochronna, w której mogą przebywać wyłącznie pracownicy wyposażeni w urządzenia zabezpieczające ich przed szkodliwym działaniem pól elektromagnetycznych". W zasadzie nie powinno być rozbieżności pomiędzy ustaleniami w obowiązujących rozporządzeniach i w Polskich Normach. Tymczasem widać z przytoczonych przykładów niejednokrotne podejście do oceny zagrożenia ze strony pól e-m strefy niebezpiecznej. Poza tym rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych natężeń pól o 0,1 — 300 MHz nie precyzuje, czy podane wielkości odnoszą się tylko do bliskich pól pulsujących, czy do pól promieniowania, czy też do obu rodzajów pól. Ma to istotne znaczenie w przypadku ustalania relacji natężeń pola E i pola H wynikającej z falowej impedancji równoważnej. Łatwo sprawdzić z relacji podanych w tabeli, jak duże są niekonsekwencje relacji pola E i pola H oraz równoważnej gęstości strumienia energii w odniesieniu do równoważnej impedancji fali płaskiej w wolnej przestrzeni. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 maja 1972 r. ustala w § 9: "Kandydaci do nauki zawodu, którego późniejsze wykonywanie wymagać będzie pracy w zasięgu pól elektromagnetycznych strefy pośredniej i strefy zagrożenia, podlegają wstępnym badaniom lekarskim i mogą być przyjęci do odpowiednich szkół po przedstawieniu zaświadczenia lekarskiego o braku przeciwwskazań do późniejszego wykonywania wyuczonego zawodu". Spełnienie tego wymagania w wyniku aktualnego badania lekarskiego jest mało prawdopodobne, gdyż trudno przewidzieć w perspektywie kilku lat nauki, jakie będą kwalifikacje danego kandydata do wykonywania zawodu. Spośród 84 kandydatów (w tym 44 dziewcząt) zakwalifikowanych w wyniku dokładnych badań lekarskich do nauki zawodu radiomechanika po trzech latach nauki dopuszczono tylko 43 do pracy w wyuczonym zawodzie, a pozostałych zdyskwalifikowano ze względu na zmiany chorobowe powstałe w trakcie nauki zawodu [Chmielewski i Kożakowski, 1973].

Doświadczenie kilkunastoletniego stosowania i analiza merytoryczna dopuszczalnych natężeń i gęstości strumienia energii pól e-m oraz ich wykorzystania do oceny narażenia osób w środowisku pracy i w środowisku komunalnym wskazują na następujące niekonsekwencje [Mikołajczyk, 1980]:

1. a) Brak uwzględnienia racjonalnej relacji pola E i pola H w zakresie impedancji równoważnej pola fali płaskiej w wolnej przestrzeni, zwłaszcza dla zakresu 0,1 — 300 MHz; b) brak uwzględnienia specyfiki fizycznej pól modulowanych (impulsowo oraz w funkcji częstotliwości i amplitudy); c) Brak uwzględnienia złożoności i kombinacji pól e-m z uwagi na zróżnicowanie ich częstotliwości; d) Nie-realność wyznaczania stref ochronnych w otoczeniu rozmaitych urządzeń generujących pola e-m ze względu na mniejsze szerokości poszczególnych stref niż wymiary poprzeczne ciała człowieka lub na zmienność położenia w przestrzeni elementów roboczych urządzenia; e) Nieadekwatność nazwy "strefa bezpieczna" dla obszaru poza strefami ochronnymi. W wielu badaniach dotyczących biologicznych efektów pól i promieniowania e-m wiele uwagi poświęcono nieliniowości między natężeniami tych pól a wielkością i kierunkiem zmian biologicznych. Okazało się bowiem, że pola e-m o słabym i bardzo słabym natężeniu, np. rzędu ułamka V/m lub kilku V/m, kilku do kilkudziesięciu $\mu\text{A/m}$ oraz ułamka mW/cm^2 , powodują

bardzo ewidentne zmiany biologiczne, podczas gdy pola o natężeniach wielokrotnie większych nie powodują takich zmian albo też powodują zmiany o innym kierunku i charakterze. Przyjęto także rozróżniać efekty biologiczne pod wpływem silnych i słabych pól e-m. Zagadnienie to ma z jednej strony bliski związek ze znaczeniem biologicznym naturalnych pól e-m i z wpływem zakłócającym pól e-m ze źródeł sztucznych (przemysłowych), a z drugiej strony bardzo problematyczne jest stosowanie takich określeń, jak "natężenia bezpieczne pól e-m" albo "strefa bezpieczna pól e-m".

2. Pomiaru rozmaitych parametrów biologicznych, jak temperatura lokalnie w tkankach, wrażenia słuchowe, zmiany hormonalne, zmiany odpornościowe i hematologiczne, zmiany przebiegu prądów czynnościowych w układzie nerwowym i w mięśniu serca wykazują, że zmiany takie występują pod wpływem pól i promieniowania e-m o gęstościach mocy poniżej 100 W/m^2 i odpowiadających dla fali płaskiej w wolnej przestrzeni natężeniom poniżej 200 V/m pola E i $0,5 \text{ A}$ pola H dla częstotliwości od kHz do GHz. Dopuszczalne wartości natężeń pól e-m, tak w odniesieniu do narażenia zawodowego, jak i do narażenia ogółu ludności, powinny być mniejsze od wymienionych powyżej gęstości strumienia energii i natężeń przez zastosowanie odpowiednich współczynników bezpieczeństwa. Dopuszczalne natężenia pól i promieniowania e-m powinny uwzględniać współczynnik wzmocnienia energii e-m w przypadku częstotliwości rezonansowych.

3. Propagacja pól i promieniowania e-m oraz ich oddziaływanie na obiekty biologiczne są bardzo złożone i stąd standard dopuszczalnych natężeń nie może być zbyt skomplikowany tak w odniesieniu do natężeń, jak i w odniesieniu do metodyki pomiaru i oceny, aby nie stwarzać podstaw do działań pozornych, lecz dawać możliwość realnej ochrony osób przed szkodliwym działaniem energii e-m.

4. Narażenie ogółu ludności na pola i promieniowanie e-m ze źródeł sztucznych systematycznie zwiększa się i aktualnie natężenie energii e-m z tych źródeł osiąga w środowisku komunalnym wartości przewyższające wartości progowe dla najczulszych reaktorów w organizmie człowieka, prowadząc do ryzyka niekompatybilności naturalnych i sztucznych pól e-m.

Biorąc pod uwagę wymienione powyżej niedokładności, niespójność i niekonsekwencje w obowiązujących przepisach i normatywach oraz uwzględniając osiągnięte postępy badań nad działaniem biologicznym pól e-m i potrzebę objęcia przepisami NDN wszystkich praktycznie wykorzystywanych częstotliwości pól e-m, przedstawiono propozycję tak szeroko ujętych dopuszczalnych natężeń pól e-m [Mikołajczyk, 1984]. W przygotowaniu tego projektu NDN pól e-m uwzględniono następujące parametry i kryteria:

- 1) przedziały normowanych częstotliwości pól e-m,
- 2) stosowane jednostki ilościowej oceny parametrów pól e-m,
- 3) relacje wektorów E:H w polach e-m,
- 4) podstawowe kryteria uzasadniające przyjęte NDN,
- 5) relacje NDN w odniesieniu do środowiska pracy i do środowiska komunalnego.



Zakresy i przedziały częstości, w jakich ustalono NDN pól e-m, odpowiadają podziałowi dokonанemu w przepisach ITU (1982) (tab. 1). Uwzględniono częstości rezonansowego pochłaniania energii e-m, które mieszczą się w przedziale 20 – 300 MHz zależnie od wielkości organizmu i jego członów, licząc od niemowląt do dorosłego człowieka. Główne częstości rezonansowe w odniesieniu do ludzi dorosłych mieszczą się w przedziale 70 – 300 MHz. W zakresie rezonansowego pochłaniania energii e-m dopuszczalne wielkości pól e-m winny być najbardziej rygorystyczne, głównie ze względu na ograniczenie ogólnego i lokalnego efektu termicznego. Jednakże tak jak przy ustalaniu NDN pól e-m uwzględnia się odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa, tak i w odniesieniu do przedziału normowanych częstości zastosowano pewien margines leżący poniżej i powyżej granicznych częstości rezonansowych. Chodzi tutaj zwłaszcza o dolną graniczną częstość rezonansową, za którą przyjmuje się 30 lub 20 MHz. Dla zapewnienia marginesu bezpieczeństwa przyjęto dla częstości rezonansowych przedział 10 – 300 MHz. Jednostkami ilościowej oceny pól e-m są:

- a) natężenie pola elektrycznego E w V/m, wartości rms;
- b) natężenie pola magnetycznego H w A/m, wartości rms;
- c) gęstość strumienia energii P w W/m^2 , wartości uśrednione.

Niezależnie od tego, jaki parametr pól e-m bierze się pierwotnie pod uwagę, obowiązuje spójna zależność tego parametru (wektora) od pozostałych parametrów (wektorów), przy czym stosunek wektorów $E:H$ wynosi $120\pi \Omega$, tj. jak w fali płaskiej w wolnej przestrzeni, czyli jak w fali płaskiej strefy promieniowania (w odpowiedniej odległości od źródła pola e-m). Przyjęta spójność wewnętrzna zależności wektorowych w NDN pól e-m daje dwie korzyści praktyczne: 1) można mierzyć dowolny z tych wektorów, gdyż z jego wartości można obliczyć wartości pozostałych wektorów; 2) mierząc wartości skuteczne wektora E , tj. E^2/m^2 , i wektora H , tj. A^2/m^2 , można stosować NDN w odniesieniu do pulsujących pól e-m w pobliżu ich źródeł, co ma istotne znaczenie do oceny pól e-m z higienicznego punktu widzenia, gdyż przeważnie stanowiska pracy znajdują się w pobliżu urządzeń wytwarzających pola. Jak wynikało z badań do dokumentacji zweryfikowanego standardu GOST/1986 [Sawin i współaut., 1983], można było ustalić:

1. Zależność pomiędzy efektami biologicznymi i gęstościami strumienia energii mikrofalowej P : a) jest nieliniowa, gdy $P > 4 - 10 \text{ mW/cm}^2$, b) jest liniowa, gdy $P < 4 \text{ mW/cm}^2$.

2. Potwierdzono zasadność dopuszczalnej wartości $100 \mu W/cm^2$ w odniesieniu do 2-godzinnej ekspozycji dziennie.

3. Obciążenie energetyczne organizmu wynoszące $200 \mu W/cm^2$ przyjęto za podstawę określenia dopuszczalnej gęstości strumienia energii mikrofalowej w zależności od czasu narażenia.

Istotnym postępowaniem w ocenie biologicznego działania pól e-m było wprowadzenie nowej wielkości oceniającej swoiste tempo pochłaniania (energii), tj. SAR (= specific absorption rate), wyrażanej w W/kg, co pozwala ocenić rzeczywistą ilość energii e-m pochłoniętej w tkankach [Johnson, 1975]. W czasie opracowywania nowej wersji standardu ANSI C95.1-1982 osiągnięto pełną jednomyslność po-

głódów, że pochłanianie mocy 4 W/kg stanowi progową wielkość energii e-m do spowodowania wykrywalnych przyrostów temperatury i niekorzystnych zmian biologicznych. Dlatego tę wartość pochłaniania mocy przyjęto za podstawę ustalenia NDN pól e-m. W odniesieniu do tej wartości 4 W/kg zastosowano współczynnik bezpieczeństwa 10 i otrzymano dopuszczalną wartość 0,4 W/kg. Wychodząc z tej wartości, obliczono NDN e-m źródnicowane w funkcji częstotliwości.

Własne pomiary doświadczalne na zwierzętach wykazały [Mikołajczyk, 1981], że progowe pochłanianie mocy mikrofal do spowodowania zmian rozmaitych parametrów biologicznych (przyrost temperatury, zmiany ilości wody i jonów) wynosi 4,2 – 6,3 W/kg w narażeniu ostrym oraz 2,5 – 3,0 W/kg w narażeniu powtarzanym przez kilkadziesiąt dni. Te wartości przyjęto za podstawę ustalenia proponowanych NDN, przy czym uwzględniono nieliniową zależność występowania zmian biologicznych od natężenia pól e-m różnych zakresów częstotliwości. Do wyznaczenia dopuszczalnych wartości pól e-m zastosowano współczynnik bezpieczeństwa 10 w odniesieniu do narażenia zawodowego i współczynnik bezpieczeństwa 100 w odniesieniu do narażenia ogółu ludności. Narażenie ludzi na pola i promieniowanie e-m określono terminem ekspozycja oznaczającym oddziaływanie energii e-m na ludzi, przy czym wprowadzono następujące definicje (tab. 23):

1. Ekspozycja naturalna (EN) oznacza ciągłe oddziaływanie naturalnych pól i promieniowania e-m.

2. Ekspozycja zwyczajna (EZ) oznacza ciągłe, przerywane lub krótkotrwałe oddziaływanie pól i promieniowania e-m ze źródeł sztucznych, takich jak radio- i telekomunikacja, radiolokacja, urządzenia przemysłowe i lecznicze, linie i urządzenia wysokiego napięcia, linie i urządzenia niskiego napięcia, sprzęt elektryczny i elektroniczny powszechnego użytku.

3. Ekspozycja profesjonalna (EP) oznacza oddziaływanie pól i promieniowania e-m podczas wykonywania pracy zawodowej przy użytkowaniu urządzeń i posługiwaniu się nimi. EP trwa nie dłużej niż zmianę roboczą.

Ekspozycja naturalna obejmuje ogół ludności i zależy od procesów fizycznych w środowisku ziemskim i pozaziemskim. Ekspozycja zwyczajna obejmuje grupy osób lub pojedyncze osoby i zależy od liczby urządzeń generujących promieniowanie e-m do wolnej przestrzeni. Wielkość ekspozycji zwyczajnej dla populacji polskiej nie jest znana, gdyż nie było dotychczas odpowiednich pomiarów i badań. Ekspozycja profesjonalna dotyczy osób dorosłych o odpowiednim stanie zdrowia, stwierdzonym na podstawie badań lekarskich.

Pomiary pól i promieniowania e-m należy wykonywać w miejscach stałego przebywania ludzi, tj. w miejscu zamieszkania (na zewnątrz i wewnątrz budynków), na stałych stanowiskach pracy oraz w miejscach potencjalnego przebywania podczas wykonywania pracy przy urządzeniach generujących, podczas prac w terenie i w gospodarstwie domowym.

Zalecono również wykorzystanie w praktyce następujących wytycznych:

1. Na stanowiskach pracy ograniczyć źródnicowanie częstotliwości pól e-m (urządzenia o różnych częstotliwościach instalować w oddzielnych pomieszczeniach). W razie jednoczesnego występowania pól e-m z różnych przedziałów normowanych częstot-

Uaktualniony projekt NDN pól e-m przedziału 50 Hz – 300 000 MHz

Przedziały częstotliwości oraz wektory pól e-m		Ekspozycja zwyczajna		Ekspozycja profesjonalna	
		podstawowa (cała doba)	dodatkowa (1 h/dobę)	podstawowa (8 h/dobę)	dodatkowa (1 h/dobę)
		obszar poza strefami ochronnymi	strefa		
ochronna II ^o	ochronna I ^o (pośrednia)		zagrożenia		
50 – 100 Hz	E V/m	500	1000	5000	15 000
	H A/m	1,5	3,0	15	40
	S W/m ²	750	3000	75 000	600 000
100 Hz – 10 kHz	E V/m	500/0,01f	1000/0,01f	5000/0,01f	15 000/0,01f
	H A/m	1,5/0,01f	3,0/0,01f	15/0,01f	40/0,01f
	S W/m ²	750 : f	3000 : f	75 000 : f	600 000 : f
10 kHz – 10 MHz	E V/m	5	10	50	150
	H A/m	0,015	0,03	0,15	0,4
	S W/m ²	0,075	0,30	7,50	60
10 – 300 MHz	E V/m	2,5	5	25	75
	H A/m	0,007	0,015	0,07	0,2
	S W/m ²	0,02	0,075	1,75	15
300 – 300 000 MHz					
a) stacjonarne	S W/m ²	0,12	0,50	2,50	25
	E V/m	6	12	30	100
	H A/m	0,02	0,04	0,08	0,25
b) niestacjo- narne	S W/m ²	0,25	1,00	5	50
	E V/m	10	20	50	150
	H A/m	0,025	0,05	0,10	0,40

Uwaga: Na pierwszym miejscu podano wielkości główne wektorów, natomiast obliczenia wielkości pozostałych wektorów podano z dokładnością do pierwszej cyfry znaczącej. W relacji wektora E do wektora H przyjęto impedancję równoważną fali płaskiej w wolnej przestrzeni.



1, tj. pól złożonych i kombinowanych, oceniać narażenie według zasady addytywnego działania poszczególnych pól e-m (suma stosunków wartości zmierzonych do wartości dopuszczalnych w poszczególnych zakresach nie może być większa od 1).

2. W odniesieniu do częstości rezonansowych 10 – 300 MHz zastosowano najniższe dopuszczalne wartości pól e-m. Te ograniczenia zapewniają dostateczny współczynnik bezpieczeństwa w określonych częstościach pól e-m, ale może on być niedostateczny w przypadku jednoczesnego działania pól e-m tego samego przedziału częstości.

3. Należy eliminować warunki powstawania częstości wyższych harmonicznymi i warunki narażenia na takie pola e-m.

4. W przypadku usytuowania stanowisk pracy w zasięgu pulsującego pola e-m należy brać do oceny wielkości podstawowe dopuszczalnych natężeń pól i promieniowania e-m, gdyż relacje wektorów E:H są zmienne w tym obszarze pól e-m.

5. Przedstawione dopuszczalne wielkości pól e-m nie wykluczają możliwości wyznaczenia stref ochronnych w razie potrzeby takiego oznakowania zasięgu pól e-m w środowisku pracy i w środowisku komunalnym.

Dopuszczalne natężenia pól e-m wg powyższego projektu podano w tabeli 23.

Po przedstawieniu obowiązujących NDN i proponowanych wytycznych NDN pól e-m można przedstawić pewne rozważania natury ogólnej. Pomimo pewnego zbliżenia stanowisk w sprawie dopuszczalnych natężeń pól e-m w standardach ANSI i GOST nadal utrzymują się istotne rozbieżności w sprawach normowanych podzakresów częstości pól e-m i ich wielkości, zwłaszcza w odniesieniu do małych (LF) i bardzo małych (ELF) częstości. Największe różnice dotyczą wartości dopuszczalnych składowej magnetycznej pól e-m. Różnice są ilościowo najbardziej uderzające w przepisach polskich obejmujących przedział 0,1 – 10 MHz, na co zwrócono uwagę w publikacjach dotyczących prezentacji NDN pól e-m [Guy, 1978; WHO-EHC, 1981; Mikołajczyk, 1980; Harlen, 1982]. Jeśli z jednej strony przyjęto jako dopuszczalną indukcję 2 T stałego pola magnetycznego w przypadku badania obrazowego RMR i dopuszczalne natężenie do 250 A/m zmiennego pola magnetycznego w przedziale 0,1 – 10 MHz (przepisy polskie) oraz do 500 A/m wolnozmiennego pola magnetycznego (standard DIN-1984), a z drugiej strony (inne standardy) jako dopuszczalne natężenie od ułamka do pojedynczych A/m pola e-m przedziału 0,01 MHz do 300 GHz (realizując zasadę impedancji równoważnej pól E i H w fali płaskiej w wolnej przestrzeni), to nasuwa się zasadnicze pytanie, jak te rozbieżności pogodzić z natężeniem naturalnego pola magnetycznego wynoszącym 30 – 80 A/m (0,03 – 0,08 G). Otóż równoważna impedancja falowa składowej E do składowej H jest ściśle ustalona tylko dla fali płaskiej w wolnej przestrzeni i wynosi $120\pi \Omega$, i jest to różnica dwóch rzędów wielkości. Człowiek rozwijał się i znajduje w środowisku, w którym występują naturalne pola e-m i pola e-m ze źródeł sztucznych, przy czym w tym środowisku co najmniej te ostatnie pola związane są ze strefą daleką promieniowania e-m cechującą się równoważną impedancją dwóch rzędów wielkości. Z biologicznego punktu widzenia jest oczywistym wymaganie, aby zachowana była taka sama zależność składowych E i H w dopuszczalnych natężeniach pól e-m ze źródeł sztucznych na stanowiskach pracy. Zbyt li-

beralne dostosowanie NDN pól e-m do zadawanych parametrów technicznych urządzeń generującym pola e-m może doprowadzić do niekorzystnych zmian w stanie zdrowia osób narażonych na pola e-m w środowisku pracy. Poza tym naturalne pola e-m mają określony układ linii sił, co ma istotne znaczenie dla obiektów biologicznych, natomiast wszelkie sztucznie wytwarzane pola e-m mają zupełnie przypadkowy układ linii sił i na tym może polegać zasadnicza niekompatybilność sztucznych w stosunku do naturalnych pól e-m. Aby zminimalizować taką niekompatybilność pól e-m, racjonalne jest maksymalne ograniczanie natężenia sztucznych pól e-m, zwłaszcza składowej magnetycznej. W świetle tej koncepcji celowe jest nawiązanie do lansowanej od 1965 r. przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP — International Commission on Radiological Protection) zasady ALARA w odniesieniu do promieniowania jonizującego. Zasada ALARA (akronim "low as readily achievable" — tak mało, jak tylko jest to osiągalne) została oparta na założeniu, że wszelkie narażenie na promieniowanie jest niepożądane, gdyż może wiązać się z określonym ryzykiem, i dlatego ICRP przyjął tę zasadę jako podstawowe zalecenie; od owego czasu organizuje konferencje dotyczące możliwości wdrożenia tej zasady i oczekiwanych korzyści. W fachowym piśmiennictwie dotyczącym filozoficznych aspektów ograniczenia narażenia na pola e-m zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania zasady ALARA. Nie chodziło przy tym o założenie, że efekty biologiczne pól mikrofalowych i RF są takie same jak efekty biologiczne promieniowania jonizującego. Jednakże podkreślono, że wobec braku wyraźnej mierzalnych zależności dawka — odpowiedź w działaniu pól e-m, zasada zachowawcza ALARA może być użyteczna czasowo, dopóki nie zostaną ustalone dokładne zależności ilościowe narażenia ludzi na pola mikrofalowe i RF [Repacholi, 1978].

24. WYTYCZNE W SPRAWIE REALISTYCZNEJ OCENY NARAŻENIA NA POLA E-M

24.1. Rys historyczny

Problematyka pól i promieniowań niejonizujących z lekarskiego i higienicznego punktu widzenia ma aspekty bardzo podobne do problematyki promieniowania jonizującego. Zasadniczym przedziałem dzielącym te dwa rodzaje promieniowań jest wielkość energii kwantu, istotnie większa w promieniowaniu jonizującym. Higieniczna ocena narażenia na promieniowanie jonizujące osiągnęła większe postępy niż ocena narażenia na promieniowanie niejonizujące głównie dlatego, że badania związane z oceną biologicznego działania promieniowania jonizującego zostały rozwinięte na niebywale dużą skalę, co umożliwiło duży rozwój aparatury badawczej i kontrolno-pomiarowej, oraz dlatego, że łatwiejsze jest śledzenie penetracji tego promieniowania, zwłaszcza pochodzącego z izotopów. Podobnie jak w przypadku promieniowania jonizującego pola e-m o dużych natężeniach stanowią bezpośrednie ryzyko dla zdrowia i życia człowieka, pola o średnich natężeniach wykorzystywane są do celów leczniczych, a pola o słabych natężeniach wywierają działanie biologiczne na układy regulacyjne i integrujące, mające często korzystne znaczenie z biologicznego punktu widzenia.

W początkowym okresie rozważań koncepcyjnych i podejmowania po 1950 roku decyzji w sprawie dopuszczalnych natężeń pól e-m wytworzyły się dwa podejścia strategiczne. W USA za podstawę przyjęto ograniczenie efektu termicznego, który nie budził żadnych zastrzeżeń. Chodziło zatem o takie tylko ograniczenie efektu termicznego, ażeby nie było ewidentnego podwyższenia temperatury ciała w wyniku narażenia na pola e-m, zwłaszcza przedziału mikrofalowego. Stąd pierwsze NDN przyjęte w USA były bardzo liberalne i ustawicznie krytykowane w ZSRR i w innych krajach, które przyjęły podejście strategiczne ekspertów radzieckich w określeniu NDN pól e-m. Eksperci w USA zdawali sobie sprawę z tego, że ich podejście nie ograniczy postępu technicznego w wytwarzaniu urządzeń generujących pola e-m i że w miarę postępu wiedzy na temat biologicznego działania tych pól przyjęty NDN będą mogli zweryfikować i znowelizować. Przewidywania te spełniły się, gdyż w USA rozwinęto na dużą skalę produkcję rozmaitych urządzeń przemysłowych, radiokomunikacyjnych i o zastosowaniach domowych opartych na generowaniu pól e-m. W konsekwencji postępu badań nad biologicznym działaniem pól e-m pierwotny standard zmodyfikowano kilkakrotnie w sensie bardziej rygorystycznych dopuszczalnych natężeń pól e-m. Nim takie kolejne zaostrzone NDN zostały opracowane i wprowadzone do użytku, uprzedzono o tym dostatecznie wcześniej producentów urządzeń wytwarzających pola e-m. W ten sposób nowelizacja NDN nie spowodowała trudności w produkcji odpowiednich urządzeń.

Podejście strategiczne w ZSRR przy ustaleniu dopuszczalnych natężeń pól e-m przyjęło za podstawę ograniczenie nie tylko efektu termicznego, ale także domniemanych efektów nietermicznych. Przyjęto przy tym, że efekt termiczny oznacza przyrost temperatury ogólnej o więcej niż $0,2^{\circ}\text{C}$. Ustalono bardzo rygorystyczne NDN pól e-m w ZSRR oceniano w krajach zachodnich jako bardzo pożądane, ale niepraktyczne. W rzeczywistości normatywy takie mogły być często nie respektowane, o czym mogą świadczyć dosyć liczne publikacje opisujące rozmaite zmiany chorobowe u pracowników narażonych na pola e-m. Eksperci wielu krajów, w tym także eksperci polscy, zaadaptowali bez zmian radzieckie NDN, ustalając krajowe NDN. W Polsce takie NDN wprowadzono pod koniec 1961 r. w formie rozporządzenia Rady Ministrów. Te bardzo rygorystyczne NDN były korzystne z punktu widzenia ochrony zdrowia, ale były też nierealne z ekonomicznego punktu widzenia, co zresztą po kilku latach ujawniło się z całą ostrością. Okazało się mianowicie, że obowiązujące NDN uniemożliwiają korzystanie z radiotelefonów, na które występowało coraz większe zapotrzebowanie. Tym razem inicjatywę zmiany NDN podjęli nie higieniści, lecz producenci i użytkownicy urządzeń radiokomunikacyjnych (głównie radiotelefonów), wymuszając znaczną liberalizację NDN. Taka była geneza działalności komisji ekspertów, której wynikiem jest rozporządzenie Rady Ministrów z 1972 r. i rozporządzenie Ministrów: Pracy, Płac i Spraw Socjalnych oraz Zdrowia i Opieki Społecznej z 1977 r., w których zawarte są dopuszczalne natężenia pól e-m. Niekonsekwencje i niedokładności tych przepisów przedstawiono powyżej.

Wracając do pewnych analogii w ocenie działania promieniowania jonizującego i pól e-m, należy tutaj przytoczyć generalną koncepcję strategiczną przyjętą w 1965 r. przez ICRP (International Commission on Radiological Protection). W § 52

zaleceń IRCP z 1966 r. (przyjętych w 1965 r.) podane zostały następujące wytyczne w ustalaniu dopuszczalnych wartości promieniowania jonizującego: "Ponieważ każde narażenie może stwarzać pewien stopień ryzyka, Komisja zaleca, ażeby unikać każdego niepotrzebnego narażenia oraz aby wszystkie dawki były tak małe, jak to jest możliwe do osiągnięcia, biorąc pod uwagę przesłanki ekonomiczne i społeczne. Należy podkreślić, że dawki graniczne są przeznaczone do planowania budowy i działania źródeł stwarzających przewidywane warunki narażenia; ustalenie czynnych poziomów narażenia ze źródeł nie kontrolowanych polega na innych rozważaniach". Zasadniczą formułą było "tak mało, jak to jest możliwe do osiągnięcia" (as low as is readily achievable); utworzono skrót ALARA, który wyraża koncepcję Komisji ICRP. Ze względu na niejednoznaczne rozumienie podanego przez ICRP zalecenia, zwłaszcza drugiej jego części, w 1973 r. w publikacji 9 Komisja ICRP podała nową wersję § 52 w celu bardziej jednoznacznego rozumienia jej intencji: "Ponieważ każde narażenie może stwarzać pewien stopień ryzyka, Komisja zaleca, ażeby unikać każdego niepotrzebnego narażenia i ażeby wszystkie dawki usprawiedliwionego narażenia były tak małe, jak to jest możliwe do osiągnięcia, biorąc pod uwagę przesłanki ekonomiczne i społeczne". W nowej wersji zalecenia utrzymano więc zasadę ALARA (as low as is readily achievable), pomijając sprawę granicznych i faktycznych poziomów narażenia.

Z perspektywy czasu można mówić, że eksperci USA kierowali się w ustalaniu NDN pól e-m zasadą ALARA, mając głównie na uwadze aspekt ekonomiczny, natomiast w podejściu ekspertów radzieckich dominował aspekt społeczny tej zasady. Aktualnie obowiązujące NDN pól e-m w krajach zachodnich i w krajach wschodnich uległy daleko idącemu zbliżeniu, ale są dalekie jeszcze od pełnej realizacji zasady ALARA.

Od kilku lat narasta nowa potrzeba higienicznego ustanowienia NDN pól e-m małej i średniej częstości (50 Hz – 100 kHz oraz stałego pola magnetycznego i pola elektrostatycznego. Potrzeba wynika z rozwoju licznych urządzeń przemysłowych, leczniczych i badawczych, których działaniu towarzyszy silne stałe pole magnetyczne (elektrolizery, spektrometry NMR całego ciała, urządzenia do badań fizycznych i chemicznych) lub wolnozmiennie pola E i H (nagrzewnice średniej częstości, linie wysokiego napięcia). ITU w przepisach regulacyjnych z 1982 r. nie ustaliła konkretnego przydziału dla częstości do 9 kHz oraz stwierdziła, że pola e-m do 9 kHz nie powodują zakłóceń radiokomunikacyjnych. To stanowisko ITU jest prawdopodobnie główną przyczyną dużego rozwoju wielu urządzeń grzejnictwa indukcyjnego średniej częstości o dużej mocy (od dziesiątków kW do kilku MW). Producenci i użytkownicy takich urządzeń nie mają też kłopotów ze służbą sanitarną, gdyż nie ma przepisów w sprawie dopuszczalnych natężeń pól e-m o częstościach poniżej 100 kHz.

24.2. Podstawy ustalania NDN pól e-m bardzo małych i średnich częstości

W strategii opracowania NDN pól e-m bardzo małych i średnich częstości stosuje się dwa podejścia. Jedno podejście opierające się na fizycznych obliczeniach teoretycznych przyjmuje za podstawę ustalenia NDN ograniczenie natę-

zenia prądu indukowanego w ciele człowieka pod wpływem pól e-m tych przedziałów częstości (ELF i LF). Podstawa ta umożliwia ustalenie bardzo liberalnych NDN dla pola E i dla pola H tej samej częstości bez respektowania równoważnej impedancji falowej wolnej przestrzeni. Takie NDN są wprawdzie korzystne dla producentów i użytkowników urządzeń generujących pola ELF i EF, choć z drugiej strony nie ma dostatecznej liczby badań o konsekwencjach biologicznych działania tego typu pól e-m o dużych natężeniach. Konieczne jest więc oczekiwanie na dokumentację biologiczną oceny działania pól e-m ELF i LF, która byłaby podstawą określenia lub nowelizacji NDN. Drugie podejście nie neguje znaczenia obliczeń natężenia prądu indukowanego w ciele człowieka, ale w propozycji NDN stosuje w relacji pola E do pola H zasadę impedancji równoważnej dla fali płaskiej w wolnej przestrzeni. Zasada ta narzuca ograniczenie różnicy natężeń pola H do pola E o dwa rzędy wielkości. Na tym też polega główna trudność zwolenników tej zasady w jej respektowaniu przy ustaleniu NDN. Zdecydowana większość urządzeń nagrzewnictwa indukcyjnego wykorzystuje wzbudniki pętlowe (cewkowe) będące z natury źródłem silnego pola magnetycznego i względnie słabego pola E. Stąd w otoczeniu takich urządzeń występują duże natężenia pola H i bardzo małe natężenia pola E, tj. akurat odwrotnie niż to wynika z zasady równoważnej impedancji pola E do pola H. Co więcej, jeśli przyjąć tę zasadę przy ustaleniu NDN, to można z góry przewidzieć niekorzystne konsekwencje dla producentów i użytkowników nagrzewnic średniej częstości, gdyż musieliby oni ponieść znaczne koszty na ekranowanie wzbudników lub całych urządzeń, zważywszy na trudności techniczne i materiałowe w ekranowaniu pola H. Niezależnie od wymienionych podejść przy ustalaniu NDN pól e-m dużą trudność stanowią wyniki badań biologicznych wykazujące zmiany biologiczne pod wpływem słabych natężeń i brak istotnych zmian biologicznych pod wpływem dużych natężeń pól e-m. Należy pamiętać, że badania biologiczne odnoszą się do względnie krótkich okresów obserwacji, natomiast narażenie człowieka w jego środowisku pracy może trwać przez cały okres jego aktywności zawodowej, a w środowisku komunalnym przez całe życie. Wiąże się z tym problem skutków nie tylko dla zdrowia ludzi aktualnie narażonych, ale także dla przyszłych pokoleń.

25. ZNACZENIE OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH I BADAŃ BIOLOGICZNYCH W USTALANIU NDN PÓL E-M

25.1. Ustalenia ogólne

Pola e-m wszystkich przedziałów częstości działają na ogólnoustrojowe układy regulacyjne i integrujące, tj. układ nerwowy, układ hormonalny i układ łącznotkankowy. Fizjologiczne funkcjonowanie tych układów jest powiązane z naturalnymi polami e-m. Jeżeli nawet układy te mają określone granice tolerancji na zakłócenia przez inne niż naturalne pola e-m, to jednak długotrwałe narażenie na takie pola e-m doprowadzi do ujawnienia się zaburzeń ze strony układów regulacyjnych, czego wyrazem mogą być rozmaite subiektywne i obiektywne zmiany

czynnościowe i anatomiczne w tym pokoleniu i w następnych. Takie przewidywane narastające w czasie odległe skutki biologiczne narażenia na pola e-m winny być jedną z głównych podstaw postępowania strategicznego w ustalaniu NDN pól e-m.

25.2. Ustalenia w odrębnych przedziałach częstości pól e-m

1. W przedziale HF i VHF o efekcie termicznym decyduje średnia wartość pochłaniania mocy (SAR) dla całego ciała i w poszczególnych narządach lub częściach ciała oraz wzmożenie pochłaniania energii e-m wynikające z właściwości rezonansowych parametrycznych całego ciała i części ciała człowieka. Nietermiczne działania biologiczne są nieliniowe w funkcji natężeń pól e-m tych przedziałów częstości.

2. W przedziale ELF i LF o efekcie termicznym decyduje gęstość prądu indukowanego w ciele człowieka. Na podstawie obliczeń teoretycznych podano wartości gęstości prądu w ciele ludzkim wynikające z bioelektrycznej funkcji mózgowia i serca oraz wartości natężeń zewnętrznego pola E i pola H do indukowania w ciele człowieka prądu o gęstościach powodujących zakłócenia bioelektrycznej funkcji mózgowia i serca. Nawet po zastosowaniu odpowiednich współczynników bezpieczeństwa można by na podstawie takich obliczeń dopuścić duże natężenia pola E i pola H w tych przedziałach częstości pól e-m. Badania biologiczne wskazują na ewidentne zmiany pod wpływem słabych natężeń pól e-m i nieistotne zmiany lub ich brak pod wpływem dużych natężeń pól e-m omawianych przedziałów częstości. Z tych trudnych do interpretacji wyników badań biologicznych można wnioskować o dopuszczalności dużych natężeń pól e-m w krótkich okresach narażenia i względnie małych natężeniach pól e-m w długich okresach narażenia. Mogłoby za tym przemawiać występowanie reakcji stresowej w początkowym okresie narażenia i adaptacja organizmu w dalszym okresie narażenia, ale nie wiadomo, czy taka adaptacja oznacza brak szkodliwego działania pól e-m.

25.3. Zalecenia zmian NDN i wytyczne do ustalania NDN pól e-m

1. Obowiązujące NDN pól e-m z 1972 i 1977 r. nie są ani bezpieczne, ani kompromisowe w świetle współczesnej wiedzy. Są dopuszczone zbyt duże natężenia pola H w przedziale 0,1–10 MHz, zbyt duże natężenia pola E w przedziale 0,1–3000 MHz oraz zbyt duże gęstości strumienia energii w przedziale do 3000 MHz, głównie z powodu nieuwzględnienia właściwości rezonansowych ciała człowieka i nierespektowania zasady impedancji równoważnej składowych E i M.

2. Dbowiążąca w istniejących NDN pól e-m zasada stref ochronnych wymusza często w praktyce działania pozorne, bez możliwości wskazania realnych rozwiązań profilaktycznych. Należy zrezygnować z ogólnego stosowania zasady stref ochronnych i ograniczyć jej wykorzystanie do warunków umożliwiających realizację.

3. Ze względu na istotne znaczenie naturalnych pól e-m w funkcjonowaniu układów regulacyjnych w obiektach biologicznych obecność pól e-m ze źródeł sztu-

cznych jest niekorzystna dla funkcjonowania tych układów. Uzasadnione jest dążenie do eliminowania sztucznych pól e-m lub ich ograniczania w środowisku pracy i w środowisku komunalnym. Winna więc być racjonalnie stosowana zasada ALARA w tym dążeniu. Odstępstwa od zasady winny być tylko przejściowe, do czasu osiągnięcia warunków jej realizacji. Nie może być jednakże odstępstw od zasady ALARA w ograniczaniu narażenia na pola e-m w odniesieniu do kobiet ciężarnych i dzieci (od ich urodzenia do zakończenia pokwitania i dojrzewania płciowego).

4. Wyniki nawet nielicznych badań biologicznych, zwłaszcza na ludziach, w dobrze kontrolowanych warunkach winny mieć priorytetowe znaczenie (obliczenia teoretyczne przy ustalaniu NDN pól e-m na drugim planie).

5. Wymienione zalecenia nie negują uzasadnienia stosowania silnych pól e-m w celach leczniczych i diagnostycznych u ludzi. Wyniki takich zastosowań mogą być również wykorzystane przy określaniu NDN pól e-m.

PISMIENNICTWO

1. Adey W.R., Bavin S.M., Lin-Liu S.: Increase calcium efflux from cerebral tissue exposed to weak modulated microwave fields. *J Physiol* 1980, 308, 16

2. Adey W.R.: The central nervous system and radio frequencies and microwaves. *G Ital Med Lav* 1982, 4, 13-16

3. Albert E.N., Slaby E., Roche J., Loftus J.: Effect of amplitude-modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat Res* 1987, 109, 19-27

4. Antich P.P., Tokita N., Kim J.H., Halm E.W.: Selective heating of cutaneous human tumors at 27, 12 MHz. *IEEE Trans Microwave Theory Techn* 1978, MIT-26, 569-572

5. Arcangelli G., Barni E., Cividalli A., Mauro E., Morelli D., Nervi C., Spano M., Tabacchini A.: Effectiveness of microwave hyperthermia combined with ionizing radiation: clinical results on neck node metastases. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1980, 6, 143-148

6. Bailey W.H., Charry J.M.: Behavioral monitoring of rat during exposure to air ions and DC electric fields. *Bioelectromagnetics* 1986, 7, 329-339

7. Banks R.J., Beanish D., Geake M.J.: Magnetic variation anomalies in northern England and southern Scotland. *Nature* 1983, 303, 516-518

8. Baker R.R., Mather J.G., Hennaugh J.H.: Magnetic bones in human sinuses. *Nature* 1983, 301, 79

9. Barański S., Edelwejn Z.: Badanie skojarzonego działania mikrofal i niektórych leków na czynność bioelektryczną ośrodkowego układu nerwowego. *Acta Physiol Pol* 1968, 19, 37

10. Barański S., Ostrowski K., Stodolnik-Barańska W.: Badania czynnościowe i morfologiczne gruczołu tarczowego u zwierząt napromienianych mikrofalami. *Acta Physiol Pol* 1972, 23, 997
11. Barker A.T., Dixon R.A., Sharrad W.J.W., Sucliffe M.L.: Pulsed magnetic field therapy for tibia non-union. *Lancet* 1984, I, 994
12. Barnes F.S.: Interaction of DC electric field with living matter. II. Extremely low frequency (ELF) and very low frequency electric fields: rectification, frequency sensitivity, noise and related phenomena. *CRC Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. Ed Pok Ch, Postow E, CRC Pres Inc, Bocahton, FL, 1986, s. 89-114 i 122-138
13. Barregard L., Järholm B., Ungethüm E.: Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *Lancet* 1986, I,
14. Baumjohann W., Haerendel G.: Erdmagnetismus und extraterrestrische Vorgänge. *Naturwissenschaften* 1987, 74, 181-187
15. Bellosi A., Fleury E., Ben Hassel M.: Hyperthermie locale par radio-frequencies (premiers resultats). *Bull Cancer (Paris)* 1981, 68, 297-298
16. Bellosi A.: Lack of an effect of static magnetic field on calcium efflux from isolated chick brains. *Bioelectromagnetics* 1986, 7, 381
17. Berkowitz G.C., Barnes F.S.: The effects of nonlinear membrane capacity on the interaction of microwave and radio frequencies with biological materials. *IEEE Trans Microwave Theory Techn* 1979, MIT-27, 204
18. Bernhardt J.: The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat Environ Biophys* 1979, 16, 309
19. Bigu-del-Blanco J., Romero-Sierra C.: The properties of bird feathers as converse piezoelectric transducers and as receptors of microwave radiation. II. Bird feathers as dielectric receptors of microwave radiation. *Biotelemetry* 1975, 2, 354-364
20. Birenbaum L., Kaplan I.T., Metlay W., Rosenthal S.W., Zaret M.M.: Microwave and infrared effects on heart rate, respiration rate and subcutaneous temperature of the rabbit. *J Microwave Power* 1975, 10, 3
21. Blackman C.F., Benane S.G., Rabinowitz J.R., House D.E., Joines W.T.: The role for the magnetic field in the radiation-induced efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. *Bioelectromagnetics* 1985, 6, 327-337
22. Broadbent D.E., Broadbent M.H., Male J.C., Jones M.R.L.: Health of workers exposed to electric fields. *Br J Ind Med* 1985, 42, 75-84
23. Budinger T.F., Lauterbur P.C.: Nuclear magnetic resonance technology for medical studies. *Science* 1984, 226, 288-298
24. Byus C.V., Pieper S.E., Adey W.R.: The effect of low-energy 60 Hz environmental fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis (London)* 1987, 8, 1385-1389

55. Edelwejn Z., Barański S.: Badania EEG i morfologiczne wpływu promieniowania mikrofalowego na niektóre głębokie struktury ośrodkowego układu nerwowego u królików. *Postępy Fiz Med* 1971, 6, 145
56. Edelwejn Z., Barański S.: Badania nad wpływem warunków opromienienia na układ nerwowy osób zatrudnionych w zasięgu działania mikrofal. *Lek Wojsk* 1966, 42, 9, 781-786
57. Edelberg R.: Electrical properties of skin. W: *Biophysical properties of the skin*. Eiden H.R., Wiley-Intersci., a Div of J Wiley & Sons, Inc. New York - London - Sydney - Toronto 1971
58. **Electromagnetism and Cancer** (editorial). *Lancet* 1983, I, 224
59. Fajtelberg-Blank W.R., Pierewałow G.M.: Izbitalnyje diejstwie decimetrovych vołn na centralnyje struktury mozga. *Fiziol Zh SSSR* 1977, 63, 668
60. Feinendegen L.E., Möhlensiepen H.: In vivo enzyme control through a strong stationary magnetic field - the case of thymidine kinase in mouse marrow cells. *Int J Radiat Biol* 1987, 52, 3, 469-479
61. Fleck H.: Microwave oven burn. *Bull NY Acad Med* 1983, 59, 313-318
62. Fowler J.R., TerPenning B., Syverud S.A., Levy R.C.: Magnetic field hazard. *N Engl J Med* 1986, 314, 1517
63. Frey A.H.: Auditory system response to RF energy. *Aerosp Med* 1961, 32, 256
64. Frey A.H., Coren E.: Holographic assessment of hypothesized microwave hearing mechanism. *Science* 1979, 206, 232
65. Galvin M.J., Hall C.A., McRee D.I.: Microwave radiation effects on cardiac cells in vitro. *Radiat Res* 1981, 86, 358
66. Galvin M.J., Thaxton J.P., McRee D.I., Hall C.A.: Immunity in late juvenile and young adult Japanese quail as related to microwave radiation during embryology. *Int J Radiat Res* 1982, 42, 673
67. Gautherie M.: Actualites et perspectives de l'utilisation de l'hyperthermie hyperfréquence et thérapeutique cancerologique. *J Radiol* 1979, 60, 685-689
68. Gilman P.A., Ames R.G., McCawley N.A.: Leukemia risk among U.S. white male coal workers. *J Occup Med* 1985, 27, 669-671
69. Gorczyńska E.: Magnetic field provokes the increase of prostacyclin in aorta of rats. *Naturwissenschaften* 1986, 73, 675-677
70. Gorczyńska E., Galka G., Węgrzynowicz R., Mikosza H.: Effect of magnetic field on the process of cell respiration in mitochondria of rats. *Physiol Chem Phys Med NMR* 1986, 18, 61-69

71. GOST 12-1.045-84. Elektrostatyckeskiye pola. Dopustimyje urowni na ro-boczich miestach i trebowania k provedeni kontrola. Diejstw. 1985-07-01 do 1990-07-01
72. Goodman F.M., Greenebaum B., Marron M.T.: Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on Physarum polycephalum. Radiat Res 1976, 66, 531
73. Goodman E.M., Greenebaum B., Marron M.T.: Bioeffects of extremely low frequency electromagnetic fields. Variation with intensity waveform, and indi-vidual or combined electric and magnetic fields. Radiat Res 1979, 78, 485
74. Gunn S.A., Gould T.C., Anderson W.A.D.: The effect of microwave radia-tion on morphology and function of rat testis. Lab Invest 1961, 10, 301
75. Guy A.W., Webb M.D., Sorensen C.C.: Determination of power absorption in man exposed to high frequency electromagnetic fields by thermographic mea-surements on scale models. IEEE Trans Biomed Eng 1976, BME-23, 361
76. Gölich R.W., Lutz O.: Influence of strong static magnetic fields on heart muscle contraction. Phys Med Biol 1986, 31, 763-769
77. Haase H.: Electrostatic hazards: their evaluation and control. Verlag Chemie, New York 1977, s. 124
78. Hackman R.M., Graves H.B.: Corticosterone levels in mice exposed to high intensity electric fields. Behav Neurol Biol 1981, 32, 201-213
79. Harlen F.: Criteria for setting exposure limits for RF and MW. Gior Ital Med Lav 1982, 4, 39-41
80. Harwood J.M., Malin S.R.C.: Present trends in the Earths magnetic field. Nature 1976, 259, 469-471
81. Hayashi K., Oguti T., Watanabe T., Tsuruda K., Kokubun S., Horita R.E.: Power harmonic radiation enhancement during the sudden commencement of a mag-netic storm. Nature 1978, 275, 627-629
82. Hedge H., Eleftherakis E.: Air jonizations: an evolution of its physio-logical and psychological effects. Ann Occup Hyg 1982, 25, 409-419
83. Hedge A., Collis M.D.: Do negative air ions affect human mood and per-formance? Ann Occup Hyg 1987, 30, 285-290
84. Hill D.A., Walsh J.A.: The effects of wave impedence on human whole-body radiofrequency absorption rates. Defence Research Establishment Ottawa, JREO Report No 891, Sept. 1984, Ottawa, Canada
85. International Commission on Radiological Protection. Implications of Commission Recommendations that doses be kept as low as readily achievable. ICRP Publication, No 22, Pergamon Press (Oxford) 1973
86. Israël L., Besenval M.: Essai phase I, phase II d une hyperthermie lo-calisee par radiofrequence dans 49 cas de cancer profonds. Bull Cancer (Paris) 1981, 68, 296

87. Jaffe R.A., Laszewski C.A., Carr D.B., Philips R.D.: Chronic exposure to a 60 Hz electric field: effects on sympatic transmission and peripheral nerve functions in the rat. *Bioelectromagnetics* 1980, 1, 131-148
88. Jehensen P., Duboc D., Lavergne T., Guize L., Guerin F., Degeorges M., Syrota A.: Change in human cardiac rhythm induced by a 2T static magnetic fields. *Radiology* 1988, 166, 227-230.
89. Jewtuszenko G.I., Kołodub F.A., Jaszina L.N., Tkaczenko W.W.: K higieniczeskoi ocenke impulsnogo elektromagnitnogo pola niskoj czastoty. *Gig San* 1972, 8, 35-37
90. Jewtuszenko G.I., Kołodub F.A., Ostrowska I.S., Jaszina L.N., Tkaczenko W.W., Abaszin W.M., Sonica I.N.: Osobiennosti wozdejstwa na organizm impulsnykh elektromagnitnykh polej (IEMP) niskoj czastoty. W: *Gigiena Truda i Biologiceskije Dejstwie Elektromagnitnykh wołn radioczastot. Sbornik materialow czetwiertogo wsiesojuznogo sympozjum 17-10 oktobra 1972, Moskwa 1972, s. 97-99*
91. Juriew W.N., Krasnogorskaja N.W.: Wlijanie fluktuacjonnykh elektromagnitnykh polej na procesy rosta i blastogeneza. *Biull Eksp Biol Med* 1980, 90, 602-604
92. Juutilainen J., Saali K.: Development of chick embryos in 1 Hz to 100 kHz magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 1986, 25, 135-140
93. Kaczmarek L.K., Adey W.R.: Weak electric gradients change ionic and transmitter fluxes in cortex. *Brain Res* 1974, 66, 537
94. Kamenskij J.I.: Dejstwie mikrowołn na funkcjonalnoje sostojanie nerw. *Biofizika* 1964, 9, 695
95. Kantor G., Witters D.M. jr., Greiser J.W.: The performance of a new direct contact applicator for microwave diathermy. *IEEE Trans Microwave Theory Techn* 1978, MTT-26, 563-568
96. Kaplan I.T., Motlay W., Zaret M.M., Birenbaum L., Rosenthal S.W.: Absence of heart rate effects in rabbits during low level microwave irradiation. *IEEE Trans Microwave Theory Techn* 1971, MTT-19, 168
97. Kellog III E.W.: Air ions: their possible biological significance and effects. *J Bioelectricity* 1984, 3, 119-136
98. Kinouchi Y., Tanimoto S., Ushita T., Sato K., Yamaguchi H., Miyamoto H.: Effects of static magnetic fields on diffusion in solutions. *Bioelectromagnetics* 1988, 9, 159-166
99. Knave B., Gamberale F., Bergström S., Birke E., Iregren A., Kolmodin-Hedman B., Wennberg A.: Long-term exposure to electric fields. A cross-sectional epidemiological investigation of occupationally exposed workers in high-voltage substations. *Scand J Work Environ Health* 1979, 5, 115-125
100. Kolesnik F.A., Małyszew W.M., Muraszow B.F.: O naruszeni endokrinnoi sistemy pri chroniczeskom wozdejstwi SWCh pola. *Voen Med Zh* 1967, 7, 39-41

101. Kołodub F.A., Jewtuszenko G.I.: Naruszenie obmienu wieszczestw i funkcjonalnego sostojania peczeni pri wozdejstwi impulsnogo elektromagnitnogo pola niskoj czastoty. Gig Tr Prof Zabol 1974, 2, 11-15
102. Korniewicz H.: Normalizacja warunków pracy przy monitorach ekranowych. Bezp Pracy 1986, 11, 7-10
103. Korniewicz H., Koperski A.: Elektrotermia. Higiena pracy w polach wielkiej częstotliwości. WNT, Warszawa 1979
104. Kritikos H.N., Schwan H.P.: Formation of hot spots in multilayer spheres. IEEE Trans Biomed Eng 1976, BME-23, 168
105. Krueger A.P.: Air ions and physiological function. J Gen Physiol 1962, 45, 233-241
106. Kwasucki J., Szczudlik A.: Ocena przeciwbólowego działania prądów interferencyjnych w bólach korzeniowych. Neurol Neurochir Pol 1984, 18, 235-240
107. Labarca C., Paigen K.: A simple, rapid and sensitive DNA assay procedure. Anal Biochem 1980, 102, 344-352
108. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Psychoactive-drug response is affected by acute low-level microwave irradiation. Bioelectromagnetics 1983, 4, 205-214
109. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Naloxone blocable, classically conditionable hyperthermia in the rat after microwave exposure. Cooper, Lomax, Schönbaum, Veale (eds): Homeostasis and thermal stress. 6th Int Symp Pharmacol Thermoregulation, Jasper, Alta 1985, 174-179. Karger, Basel, 1986
110. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Effects of low-level microwave irradiation on amphetamine hypothermia are blocable by naloxone and classically conditionable. Psychopharmacology 1986, 88, 354-361
111. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Low-level microwave irradiation attenuates naloxone-induced withdrawal syndrome in morphine-dependent rats. Pharmacol Biochem Behav 1986, 24, 151-153
112. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Low-level microwave irradiation after central cholinergic activity in the rat. J Neurochem 1987, 48, 40-45
113. Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.: Effects of low-level microwave irradiation on hippocampal and frontal cortical choline uptake are classically conditionable. Pharmacol Biochem Behav 1987, 27, 635-639
114. Lai H., Horita A., Guy A.W.: Acute low-level microwave exposure and central cholinergic activity: studies on irradiation parameters. Bioelectromagnetics 1988, 9, 355-362
115. Lancranjan L., Maicanescu M., Rafaila E., Klepsch I., Popescu H.I.:

116. **Lang Siegnot:** Stoffwechselphysiologische Auswirkung der Faradayschen Abschirmung und eines künstlichen Luftelektrischen Feldes der Frequenz 10 Hz auf weisse Mäuse. Arch Met Geophys Biol, Ser B, 1972, 20, 109
117. **Langauer-Lewowicka H., Braszczyńska Z.:** Próba oceny skojarzonego działania niektórych szkodliwości fizycznych i chemicznych na układ nerwowy. Neurol Neurochir Pol 1983, 17(33), 91
118. **Liboff A.R.:** Cell-field interactions at extremely low frequencies. Bull Am Physiol Soc 1985, 30, 548a
119. **Liburdy R.P.:** Effects of radio-frequency radiation on inflammation. Radio Science 1977, 12, 179-181
120. **Liburdy R.P.:** Radiofrequency radiation alters the immune system. II. Modulation of in vivo lymphocyte circulation. Radiat Res 1980, 83, 66-73
121. **Lin R.S., Dischinger P.C., Conde J., Farrell K.P.:** Occupational exposure to electromagnetic fields and the occurrence of brain tumors. J Occup Med 1985, 27, 413-419
122. **Lin L.M., Rosenbaum P.J., Pickard W.F.:** The insensitivity of frog heart to pulse modulated microwave energy. J Microwave Power 1976, 11, 225
123. **Lotz V.G., Michaelson S.M.:** Temperature and corticosterone relationships in microwave-exposed rats. J Appl Physiol 1979, 44, 438
124. **Luk K.H., Purser Ph.R., Castro J.R., Meyler T.S., Phillips T.L.:** Clinical experiences with local microwave hyperthermia. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1981, 7, 615-619
125. **McLaughlin J.T.:** Tissue destruction and death from microwave radiation (radar). Calif Med 1957, 86, 336-339
126. **Malinin G.I., Gregory W.D., Morelli L., Sharma V.K., Houck J.C.:** Evidence of morphological and physiological transformation of mammalian cells by strong magnetic fields. Science 1976, 194, 844-846
127. **Malter M., Schriever G., Köhnlen R., Süss R.:** Tumoricidal cells increased by pulsating magnetic field. Anticancer Res 1987, 7, 391-394
128. **Marble A.E., MacDonald A.C., McVicar D., Roberts A.:** Electrostatic energy discharge from humans. Nature 1976, 262, 171-172
129. **Marczenko A.W., Broitman W.I.:** Woprosy higieny truda pri indukcijonnoi nagrewnke detalej sielskohozjastwiennych maszin twiordymi vysokochromistymi spławkami. Gig Tr Prof Zabol 1977, 2, 44-45
130. **Marme D.:** Calcium-molekulare Mechanismen der zellulären Funktion. Naturwissenschaften 1985, 72, 113
131. **Maroon M.T., Goodman E.M., Greenebaum B.:** Mitotic delay in the slime mould Physarum polycephalum induced by low intensity to 75 Hz electromagnetic field. Nature 1975, 254, 66

132. Maroon M.T., Goodman E.M., Greenebaum B.: Effect of weak electromagnetic fields on *Physarum polycephalum*: mitotic delay in heterokaryons and decreased respiration. *Experientia* 1978, 34, 589
133. Mikołajczyk H.: Reakcje hormonalne i zmiany w gruczołach dokrewnych pod wpływem mikrofal. *Med Lotnicza* 1972, 39, 39-51
134. Mikołajczyk H.: Podstawy działania hormonów. PWN, Warszawa 1972
135. Mikołajczyk H.: Microwave radiation and endocrine functions. *Proc Int Symposium on Biological Effects of Microwave Radiation*, Warszawa 15-18 October 1973. Pol Med Publisher, Warszawa 1974, s. 46-51
136. Mikołajczyk H.: Pola elektromagnetyczne. PWN, Warszawa 1974
137. Mikołajczyk H.: Działanie biologiczne pól elektromagnetycznych zakresu do 300 MHz (przebieg ciąży, liczebność potomstwa i gonadotropowa czynność przysadki). *Med Pr* 1978, 29, 111
138. Mikołajczyk H.: Pola e-m a układy regulacyjne w żywym ustroju. Materiały Sympozjum nt. Bioelektronika 14-15.05.1975 Lublin
139. Mikołajczyk H.: Microwave-induced increase of water and conductivity in submaxillary salivary gland of rats. *Bioelectromagnetics* 1981, 2, 51
140. Mikołajczyk H.: Potrzeba modyfikacji dopuszczalnych natężeń pól elektromagnetycznych i zmian w odpowiednich przepisach. *Stud Mat Monogr IMP Łódź*, 1980, 2, 131-144
141. Mikołajczyk H.: Postępy oceny efektów biologicznych i norm higienicznych pól e-m. *St Mat Monogr IMP Łódź*, 1981, 4/8, 5-30
142. Mikołajczyk H.: Differences of biological effects of simple and combined e-m fields. *Proc of EMC-84 International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wrocław 1984, s. 233-242
143. Mikołajczyk H.: Low frequency electromagnetic fields and biological systems. *Proc of EMC-86 International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wrocław 24-26 June, 1986, s. 101-109
144. Mikołajczyk H. i współaut.: Określenie NDN pól elektrycznych i magnetycznych 1-100 kHz na podstawie analizy stanu zdrowia pracowników zatrudnionych w narażeniu na takie pola oraz wyników własnych badań biologicznych i studiów literatury. Sprawozdanie z wykonania tematu CPBR 11.1 nr 29/83, 1987
145. Mikołajczyk H.: Podstawy oceny i NDN pól elektromagnetycznych. *Med Pr* 1984, 35, 427-434
146. Mikołajczyk H., Kameduła M.: Biological effect related to E and H vectors of electromagnetic fields. *Proc of EMC-88 International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility* June 28-30, 1988, s. 427-431
147. Minecki L.: Promieniowanie elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości. Działanie biologiczne i ochrona zdrowia. WZ CRZZ, Warszawa 1967

148. **Milczarek H.:** Neurologiczny zespół tzw. choroby mikrofalowej. *Lek Wojsk* 1971, 5, 442-447.
149. **Milham S.:** Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *NN Engl J Med* 1982, 307, 249
150. **Milham S.:** Silent keys: leukemia mortality in amateur radio operators. *Lancet* 1985, I, 812
151. **Milham S.:** Increased mortality in amateur radio operators due to lymphocytic and hematopoietic malignancies. *Am J Epidemiol* 1988, 127, 50-54
152. **Miller G.L., Goldes R.H., Miller E.E.:** Determination of pentoses. Effect of varying proportion of components of Bial a color reagent. *Anal Chem* 1951, 23, 903-905
153. **Mitchell J.C.:** New guidelines for radiofrequency radiation safety. *EMC Symposium, Zurich 8-10 March, 1983*, s. 97-102
154. **Mitsuyuki A., Hiraoka M., Tachakashi M., Wgawa S., Matsuda G., Onoyama Y., Morita K., Kakehi M., Sugahara T.:** Multi-institutional studies on hyperthermia using an 8 MHz radiofrequency capacitive heating device (thermotron RF-8) in combination with radiation for cancer therapy. *Cancer* 1986, 58, 1589-1595
155. **Moidel R.A., Wolfson S.K. jr., Selker R.R., Duner S.R.:** Materials for selective tissue heating in a radiofrequency e-m fields for combined chemotherapy treatment of brain tumors. *J Biomed Mater Res* 1976, 10, 327
156. **Mooney N.A., Smith R.E., Watson B.W.:** Effect of extremely-low-frequency pulsed magnetic fields on the mitogenic response of peripheral blood mononuclear cells. *Bioelectromagnetics* 1986, 7, 387
157. **Muraszow B.F., Krasnodajew P.E., Godani B.L., Romanuszko W.A.:** Sostojanie adrenokortikotropnoi aktivnosti gipofiza po wozdziejstwi SWCz pola. *Gig Sanit* 1975, 3, 36
158. **Nemec H.:** *Vademecum der Interferenz-Stromtherapie*. Bonn 1966
159. **Neyton J., Trautman A.:** Single-channel currents of an intercellular junction. *Nature* 1985, 317, 331
160. **Nguyen D.D., Chive M., Leroy Y., Constant E.:** Combination of local heating and radiometry by microwaves. *IEEE Trans Instrum Measur* 1980, IM-29, 143-144
161. **Paff G.H., Boucek R.J., Nieman R.E., Deichman W.B.:** The embryonic heart subjected to radar. *Anat Rec* 1963, 147, 379
162. **Palti Y., DeNour E., Abrahamov A.:** The effects of atmospheric ions on the respiratory system of infants. *Pediatrics* 1966, 38, 405-411
163. **Park C.G., Chang D.C.d.:** Transmitter simulation of power line radiation effects in the magnetosphere. *Geophysical Res Lett* 1978, 5, 861-864
164. **Park C.G., Helliwell R.A.:** Magnetospheric effects of power line radiation. *Science* 1978, 200, 727-730

165. Peach N.E., Sheppard R.A., Howard J.K., Fraser J., Lilley B.M.: Leukemia in electrical workers in New Zealand. *Lancet* 1985, I, 811-812
166. Persinger M.A., Ludwig H.W., Ossenkopf K.P.: Psychophysiological effects of extremely low frequency e-m fields: a review. *Percept Motor Skills* 36, 1973, 1131, Monograph Suppl 3-V3b, 1973
167. Pettig R., Kell D.B.: The passive electrical properties of biological systems: their significance in physiology, biophysics and biotechnology. *Phys Med Biol* 1987, 32, 933-970
168. Pilla A.A., Kaufman J.J.: Electromagnetic modulation of cell function: frequency characteristics of impulse wave forms. *J Bioelectricity* 1984, 3, 3-18
169. Piekara A.H.: Elektryczność i magnetyzm. PWN, Warszawa 1972
170. Piotrowska K., Edwards D., Mitch A., Dougherty R.C.: Magnetic and other field effects in prochiral chemical reactions. *Naturwissenschaften* 1980, 67, 442-445
171. Portnow F.G., Niepomiaszczyj I.P., Jerusalimskij A.P.: Aktualne woprosy gigieny truda i professionalnych patologii pri vozdeistvi staticzeskogo elektrichestwa. *Sbornik Materialow Czetwiertogo Wsesojuznogo Sympozjum 17-19 Oktobra 1971, Moskwa 1972*
172. Portnow F.G., Izrael L.I., Niepomiaszczyj P.I.: Niekotoryje itogi izuczenia wlijanija staticzeskich elektriczeskich polej (SEP) w eksperimencie. *Sbornik Materialow Czetwiertogo Wsesojuznogo Sympozjuma, 17-19 Oktobra 1971, Moskwa 1972*
173. *Radio Regulations*, ITU. Ed of 1982, revised in 1985 and 1986
174. Randall J.E.: Elements of biophysics. Year Book Med Publ, Inc, Chicago 2nd ed., 1962
175. Randell C.A., Surrell J.A., Cohle S.D.: Microwave oven burns to children: an unusual manifestation of child abuse. *Pediatrics* 1987, 79, 255-260.
176. *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection* (1966) (Adopted 17 Sept. 1965). ICRP Publication 9, Pergamon Press, Oxford 1966
177. Reilly J.P., Larkin W.D.: Understanding transient electric shock. *Johns Hopkins APL Techn Digest*, 1984, 5, 296-304
178. Repacholi M.H.: Proposed exposure limits for microwave and radiofrequency radiations in Canada. *J Microwave Power* 1979, 13, 199-211
179. Reuss S., Olcese J., Vollarth L., Skaley M., Meves M.: Lack of effect of NMR-strength magnetic fields on rat pineal melatonin synthesis. *IRCS Med Sci* 1985, 13, 471
180. Romer-Sierra C.: Biological effects of nonionizing radiation: an outline of fundamental laws. *Ann NY Acad Sci* 1974, 238, 263

181. Rose V.E., Gellin G.A., Powell Ch.H., Bourne H.G.: Evaluation and control of exposures in repairing microwave ovens. Am Ind Hyg Assoc J 1969, 30, 137-142
182. Rosenthal D.S., Beering S.C.: Hypogonadism after microwave radiation. JAMA 1968, 205, 245-248
183. Russell D.N., Webb S.J.: Eukaryotic vs procaryotic metabolic response to a low-amplitude swept-frequency magnetic fields. J Bioelectricity 1987, 6, 213-217
184. Rybka E.: Astronomia ogólna. Wyd. VII. PWN, Warszawa 1983
185. Sałasziński K.: Aerojonizacja w pomieszczeniach zamkniętych. Post Fiz Med 1973, 8, 51-58
186. Sawicki W., Ostrowski K.: Non-thermal effects of microwave radiation in vitro on peritoneal mast cells in the rat. Am J Phys Med 1968, 17, 225
187. Sawin B.M., Nikonowa K.V., Łobanowa E.A., Sadczikowa M.N., Lebed E.K.: Nowoje w normirowanii elektromagnitnyh izuczeni mikrowoļnowogo diapazona. Gig Tr Prof Zabol 1983, 3, 1-4
188. Schumann W.O., König H.: Über die Beobachtung von "Atmospherics" bei geringsten Frequenzen. Naturwissenschaften 1954, 41, 183-184
189. Schwan H.P., Foster K.R.: RF-field interaction with biological systems: electrical properties and biophysical mechanisms. Proc IEEE 1980, 68, 104
190. Schwan H.P.: Dielectric properties of cells and tissues. W: Interaction between e-m fields and cells. Ed Chiabrera A., Nicolini C., Schwan H.P. Proc of the NATO Advanced Research Workshop, Sept 17-28, Erice, Sicily, Italia, Plenum Press, NY - London, 1984
191. Servantie B., Obsenovitch I., Greton B.: Pathologie humaine due au radar. Open Symposium on the Biological Effects of electromagnetic Waves. August 1-8, 1978, Helsinki, Finland, s. 052/3-2
192. Siodorczyk A.: Fizyczna interpretacja działania prądów interferencyjnych. Post Fiz Med 1984, 19, 109-114
193. Smurowa E.I., Rogowaja T.Z., Jakub I.L.: Woprosy gigieny truda i sostojania zdorowia raboczich obsłuziwajuszczich lampowye generatory czastoty 60-90 kHz. Gig i Sanit 1964, 12, 27-30.
194. Speers M.A., Dobbins J.G., Miller S.: Occupational exposures and brain cancer mortality: a preliminary study of East Texas residents. Am J Ind Med 1988, 13, 629-638
195. Spiegel R.J., Joines W.T.: A semiclassical theory for nerve excitation by low intensity e-m fields. Bull Math Biol 1973, 35, 591
196. Spitz M.R., Johnson C.D.: Neuroblastoma and paternal occupation. Am J Epidemiol 1985, 121, 924-929

197. Stern S., Laties V.G., Stancampiano C.V., Cox C., DeLorge J.O.: Behavioral detection of 60 Hz electric fields by rats. *Bioelectromagnetics* 1983, 4, 215-247
198. Stodolnik-Barańska W.: Lymphoblastoid transformation of lymphocytes in vitro after microwave irradiation. *Nature* 1967, 214, 102
199. Strojny J.: Elektryczność statyczna w pytaniach i odpowiedziach. WNT, Warszawa 1979
200. Stuchly M.A.: Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Phys* 1986, 51, 215-225
201. Stuchly M.A.: Proposed revision of the Canadian Recommendations on radiofrequency exposure protection. *Health Phys* 1987, 53, 649-665
202. Swierdłow A.J.: Epidemiology of eye cancer in adults in England and Wales, 1962-1977. *Am J Epidemiol* 1983, 118, 292-300
203. Szmigielski S., Jeljaszewicz J., Wiranowski M.: Acute Staphylococcal infections in rabbits irradiated with 3 GHz microwaves. *Ann NY Acad Sci* 1975, 247, 305
204. Szmigielski S., Janik M., Hryniewicz W., Jeljaszewicz J., Pulveren G.: Local microwave hyperthermia (43°C) and stimulation of the macrophage and T-lymphocyte systems in treatment of Guerin epithelioma in rats. *Zsrf Krebsforsch* 1978, 91, 35
205. Takashima S., Onaral S., Schwan H.P.: Effects of modulated RF energy on the EEG of mammalian brain. Effects of acute and chronic irradiation. *Environ Biophys* 1979, 16, 15
206. Thomas T.L., Stolley P.D., Stemhagen A., Fonthan E.T.H., Blecker M.L., Stewart P.A., Hoover R.N.: Brain tumor mortality risk among men with electrical and electronic jobs: a case-control study. *J Natl Cancer Inst* 1987, 79, 233-237
207. Thorne R.M., Tsurutani B.T.: Power-line harmonic radiation: can it significantly effect the earth's radiation belts? *Science* 1979, 204, 839-841
208. Tiagin N.W.: Kliniczeskije problemy obłuczenia swierchwysokoj czastotj. Leningrad, Izd Medicina 1971.
209. Tintinalli J., Krause G., Gursel E.: Microwave radiation injury. *Am Emerg Med* 1983, 12, 645-647
210. Tołgskaja M.S., Gordon Z.V.: Morfołogiczeskije izmienienia pri diejstwi elektromagnitnych wołn radioczastot. Moskwa 1971
211. Torroba L., Moreno S., Lorenzana L., Bucon L.: Purulent meningitis after percutaneous radiofrequency trigeminal rhizotomy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1987, 50, 1081-1082
212. Törnqvist S., Norell S., Ahlborn A., Knave B.: Cancer in the electric power industry. *Br J Ind Med* 1986, 43, 212-213

213. Tyczka S.: Biometeorologiczna charakterystyka środowiska atmosferycznego, s. 18-48. W: "Biometeorologia człowieka" pod red.prof. dra J. Jankowiaka. PZWL, Warszawa 1976
214. Udnicew N.A., Moroz W.W.: Reakcja gipofizarno-nadpoczecznikowej systemy na dejstwie peremiennego magnitnogo pola. Bull Eksp Biol Med 1974, 7, 51
215. Valberg P.A., Feldman H.A.: Magnetic particle motions within living cells. Measurement of cytoplasmic viscosity and motile activity. Biophys J 1987, 52, 551-561
216. Valberg P.A., Butler J.P.: Magnetic particle motions within living cells. Physical theory and techniques. Biophys J 1987, 52, 537-550
217. Valtonen E.J.: Gigant mast cells — a special degenerative form produced by microwave radiation. Exp Cell Res 1966, 43, 221
218. Vautrin J.P., Cavelier C., Clauzade B.: Le rayonnement electromagnetique "radiofrequences". Application et risques. Cah Not Doc No 98, 3^o trimestre 1978, 361-385
219. Veenstra R.D., d'Haan R.L.: Measurement of single channel currents from cardiac gap junctions. Science 1986, 233, 972
220. Vegero D., Ohlin R.: Incidence of cancer in the electronics industry: using the new Swedish cancer environment registry as a screening instrument. Br J Ind Med 1983, 40, 188-193
221. Verveen A.A., Derksen H.E.: Fluctuations phenomena in nerve membrane. Proc IEEE 1968, 56, 906
222. Viel E.: Destruction d'un sterilitet par cuivre chez une ouvriere exposee a des rayonnements electromagnetique de haute frequence. Arch Mal Prof 1984, 45, 143-144
223. Walcott Ch., Gould J.L., Kirschvink J.L.: Pigeons have magnets. Science 1979, 205, 1027
224. Webb S.J., Booth A.D.: Microwave absorption by normal and tumor cells. Science 1971, 174, 72-74
225. Weigel R.J., Jaffe R.A., Lundstrom D.L., Forsythe W.C., Anderson L.E.: Stimulation of cutaneous mechanoreceptors by 60 Hz electric fields. Bioelectromagnetics 1987, 8, 337-350
226. Weiss M.M.: The rationale for radio frequency electromagnetic exposure standards. EMC Symposium Zurich, 8-10 March, 1983, s. 93-96
227. Wertheimer N., Leeper E.: Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol 1979, 109, 273-284
228. Wertheimer N., Leeper E.: Adult cancer related to electrical wires near the home. Int J Epidemiol 1982, 111, 345-355
229. Western J.B.: Microwave radiation and human tolerance. A review. J Occup Med 1968, 10, 134-141

230. **Waver R.:** Einfluss schwacher elektromagnetischer Felder auf die circadiane Periodik des Menschen. *Naturwissenschaften* 1968, 55,29
231. **Wilson R.W.:** The cosmic microwave background radiation. *Science* 1979, 205, 866-874
232. **Wilson B.W., Anderson L.E., Hilton D.I., Phillips R.D.:** Chronic exposure to 60 Hz electric fields: effects on pineal function in the rat. *Bioelectromagnetics* 1981, 2, 371-380
233. **Wjałow A.M.:** Kliniko-gigieniczne i eksperymentalne dane o działaniu magnetycznych pól w uśłowiach produkcji. Wpływ magnetycznych pól na biologiczne obiekty. Moskwa, Nauka 1971
234. **WHO Geneva.** Environmental health criteria 16. Radiofrequency and microwaves. WHO, Geneva 1981
235. **Wright W.E., Peters J.M., Mack T.M.:** Leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *Lancet* 1982, II, 1160-1161
236. **Yerushalmi A., Shani A., Fishelovitz Y., Arielly J., Singer D., Levy E., Katsnalsen R., Rakowsky E., Stein J.A.:** Local microwave hyperthermia in the treatment of carcinoma of the prostate. *Oncology* 1986, 43, 299-305
237. **Zambrano J., Boswick J.A. jr:** Microwave injury to upper extremity: a case report. *Contemp Orthop* 1984, 9, 91-93
238. **Zeller I.:** Beeinflussung eines Herzschrittmachers durch einen Magnetkran. *Arbeitsmedizin* 1980, 15, 223-224
239. **Zervinus A.:** Chick embryo development in a 26 kHz electromagnetic field. *Am Ind Hyg Assoc J* 1973, 34, 120-127

H. MIKOŁAJCZYK, M. KAMEDUŁA

COMPARISON OF BIOLOGICAL EFFECTS DUE TO STEADY, LOW-FREQUENCY OR HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

Summary

Natural and industrial magnetic, electromagnetic and electrostatic fields were characterized. Three sorts of E-M fields were distinguished, namely: 1) simple E-M field of specified frequency and without any modulation, generated for the purpose of energy transport; 2) complex E-M field with frequency, amplitude or pulse modulation making possible the energy and information transfer; 3) combined E-M field including a variety of simple and complex E-M fields. The attention is given to immeasurable combination of E-M fields in the present day environment.

After an overview of biological effects of E-M fields which are characterized by a variety of physical sorts and intensities, the hypothesis was put forward to emphasize the existence of various biological responses obtained: 1) independently of the mode of thermal or athermal effects, each E-M field induces biological responses through the general regulatory system: nervous, hormonal or connective tissue; 2) every change of any parameter characteristic of a given E-M field influences the response of its nonthermal effect. Thus, repeatable reproduction of experimental results might be possible under precisely the same conditions of exposure, location and time.

Acute thermal effects due to short-term exposure of rats to environmental temperature of 40°C, to E-M fields of 27 MHz cw, 3000 MHz oraz 9.500 MHz pulse modulated were compared. Significant differences of conductivity in submaxillary salivary glands and of water content in peripheral blood and in kidney were found.

Another long-term exposure of rats to E or H fields of 4-45 kHz indicated a decreased growth rate of animals and decreased weight of pituitary gland and of adrenals, as well as detectable shifts of Na⁺ and K⁺ content in major anatomical regions of brain.

The detectable biological changes under the influence of weak E-M fields and the absence of such changes brought about by much stronger E-M fields have been considered to be dependent on the preservation of intercellular gap junctions in the case of weak E-M fields, and of their breakage in the case of strong fields of this type.

After critical overview of contemporary standards for E-M fields the recommendation for the strategy of assessment of E-M fields was proposed.

Х. Миколайчик, М. Камедула

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ НИЗКО- ЧАСТОТНЫХ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Содержание

Представлена характеристика натуральных и промышленных магнитных, электромагнитных и электростатических полей. Выделены три сорта э-м полей, т.е. 1/ простое э-м поле определённой частоты без никакой модуляции, которое переносит только энергию; 2/ сложное э-м поле с модуляцией частоты амплитуды или пульсации, которое переносит энергию и информацию; 3/ комбинированное э-м поле из различных простых и сложных э-м полей. Обращено внимание на чрезвычайную комбинацию э-м полей в современной окружающей среде.

После осмотра биологических эффектов э-м полей в зависимости от их различных видов и напряжённостей, представлена гипотеза о различиях полученных биологических результатов: 1/ несмотря на способ термического или нетермического эффекта каждое э-м поле вызывает биологический ответ через главные регуляционные системы: нервную, гормональную или соединительной ткани; 2/любое изменение какого-нибудь параметра или характеристики данного э-м поля влияет на реакцию его нетермического эффекта. Таким образом, повторение экспериментальных результатов является возможным только в таких же условиях экспозиции, места и времени.

Проведена острая кратковременная экспозиция крыс к действию 40°C окружающей среды или э-м полей 27 МГц постоянной волны, 3000 МГц или 9500 МГц пульсационной волны. Выявлена значительная разница проводимости в подчелюстной слюнной железе и в количестве воды в периферической крови и в почках.

Продолжительные экспозиции крыс в поле Е или Н частот 4 – 45 кГц вызвали понижение скорости роста крыс и уменьшение веса гипофиза и надпочечников и даже изменения количества Na^+ и K^+ в анатомических регионах головного мозга. Выявляемые биологические изменения под влиянием слабых э-м полей и отсутствие таких изменений под влиянием сильных э-м полей выяснены присутствием электротонических соединений между клетками и разрывом таких структур под влиянием сильных э-м полей.

Представлен критический обзор действующих стандартов для э-м полей и рекомендация для стратегии по гигиенической оценке э-м.



1984

Psychiczne obciążenie pracą nr 1(18)

1985

Narażenie na radon i aerozole promieniotwórcze
w kopalniach nr 1(19)

Chlorek winylu, dwusiarczek węgla
i pyły przemysłowe nr 2(20)

Ocena narażenia zawodowego na działanie
promieniowań: jonizującego i niejonizującego nr 3(21)

Higieniczna ocena warunków pracy w zakładach
ceramiki szlachetnej nr 4(22)

1986

Epidemiologiczna ocena ryzyka choroby nowotworowej
u osób zawodowo narażonych na pył azbestu nr 1(23)

Problemy oceny toksyczności nr 2(24)

Opieka zdrowotna w przemyśle polskim w XIX
i XX wieku (do roku 1945) na przykładzie Łodzi nr 3(25)

1987

Ostre zatrucia tlenkiem węgla zeszyt 26

Zaburzenia cyklu płciowego i płodności, prenatalnego
i postnatalnego rozwoju potomstwa oraz rozmieszczenie
kadmu, miedzi i cynku pod wpływem narażenia samicy
szczura na kadm zeszyt 27

1988

Opieka zdrowotna w przemyśle polskim w XIX
i XX wieku (do roku 1945) na przykładzie Łodzi zeszyt 28

Centralny system nadzoru radiologicznego
w kopalniach w Polsce zeszyt 29

Doświadczalna pylica krzemowa
Wpływ rzeczywistej struktury kwarcu i krystalitu
na działanie zwłókniające tych minerałów zeszyt 30

Stan obecny i perspektywy rozwoju leczenia
toksykologicznego w Polsce zeszyt 31



50.59

INSTYTUT MEDYCYNY PRACY IM. PROF. J. NOFERA

