

**BIOFIZYKA**  
**ODDZIAŁYWANIA**  
**MIKROFAL**

Nowoczesne normy określające zasady pracy w obszarach oddziaływania promieniowania radiowego oraz sposoby ochrony przed skutkami tego promieniowania pozwalają zminimalizować szkodliwość oraz zmniejszyć stopień *patologii mikrofalowej*.

Patologia mikrofalowa – szczególna postać patologii zawodowej.

Patologia zawodowa – naruszenie funkcji życiowych i uszkodzenia organiczne powstające w trakcie wykonywania czynności zawodowych.

Czynnikami patogennymi są: substancje toksyczne, pyły produkcyjne, promieniowanie jonizujące, prądy wysokiej częstotliwości, mikrofałe, wibracje, szумы, warunki meteorologiczne, zmiany ciśnienia atmosferycznego, przeciążenia fizyczne, powtarzające się typowe ruchy oraz schorzenia infekcyjne spowodowane niekorzystnymi warunkami pracy.

W niektórych przypadkach, niespodziewane oddziaływanie o dużym natężeniu (sytuacje awaryjne) lub długotrwałe oddziaływanie pól o małym natężeniu (np. przy produkcji lub eksploatacji aparatury radiowej) również mogą stwarzać określone niebezpieczeństwo.

W wyniku oddziaływania mikrofal może powstać schorzenie, które bywa nazywane „*chorobą mikrofalową*”. Jego objawy kliniczne nie są jednak właściwe wyłącznie dla mikrofal. Specyficzny charakter oddziaływania fal radiowych objawia się nie tyle w różnorodności postaci klinicznych, leczeniu i profilaktyce, ile w skomplikowanym stosunku fizycznych charakterystyk pola elektromagnetycznego z biologicznymi oraz fizjologicznymi właściwościami organizmu.

## Biofizyka oddziaływania PEM na organizmy żywe

Oddziaływanie silnych PEM na organizm człowieka prowadzi do określonych zaburzeń działalności nerwowo-psychicznej oraz fizjologicznej. Jednak jak się przypuszcza, „wieloszczeblowy” system ochrony organizmu przed szkodliwymi sygnałami, działający na wszystkich poziomach – od molekularnego do systemowego, w znacznym stopniu obniża szkodliwy wpływ „przypadkowych” dla organizmu strumieni informacji. Dlatego, jeśli obserwuje się określoną reakcję na pole (często na poziomach, które są znacznie niższe od tych, jakie są potrzebne dla powstawania wzajemnego energetycznego oddziaływania), to *można raczej mówić o podrażnieniu, niż o uszkodzeniu*, czyli o fizjologicznym aspekcie oddziaływania PEM.

Pomimo to, że od dawna jest znane inne niż tylko termiczne oddziaływanie PEM na organizm człowieka, dla określenia stopnia szkodliwości oddziaływania na razie brany jest pod uwagę poziom oddziaływania termicznego.

## *Przykłady:*

przy natężeniu pola elektrycznego o wartości  $10^{-4}$  V/m obserwuje się naczyniowy odruch warunkowy u człowieka;

przy natężeniu pola elektrycznego o wartości  $3 \cdot 10^{-2}$  V/m – zmiany ślinotoku u psa;

przy wartości strumienia mocy  $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  - zmiany encefalogramu u królika;

przy wartości strumienia mocy  $0,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  – zmiany nabłonkowych i pośrednich komórek u zwierząt.

Oddziaływanie termiczne pojawia się powyżej:  $200$  V/m dla wysokich częstotliwości oraz  $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$  dla mikrofal. Czułość komórki szacuje się na  $10^{-19}$  J/komórka.

## Biofizyka oddziaływania termicznego

Rozpatrzmy czynniki, od których zależy skuteczność nagrzewania tkanki poddanej promieniowaniu PEM. Do tych czynników należy:

1. Istnienie w tkankach strat, prądów przewodności i przemieszczenia,
2. Odbicie energii na granicy „powietrze – tkanka”,
3. Współmierność ciała człowieka do długości fali,
4. Skuteczność odprowadzania ciepła z tkanek.

# Biofizyka oddziaływania termicznego

## 1. Istnienie w tkankach strat, prądów przewodności i przemieszczenia.

Powoduje to powstawanie ciepła podczas promieniowania. Ilość ciepła wydzielanego przez ciało na jednostkę czasu przy oddziaływaniu składowej elektrycznej i magnetycznej PEM o częstotliwości  $f$  (Hz) może być oszacowana z zależności:

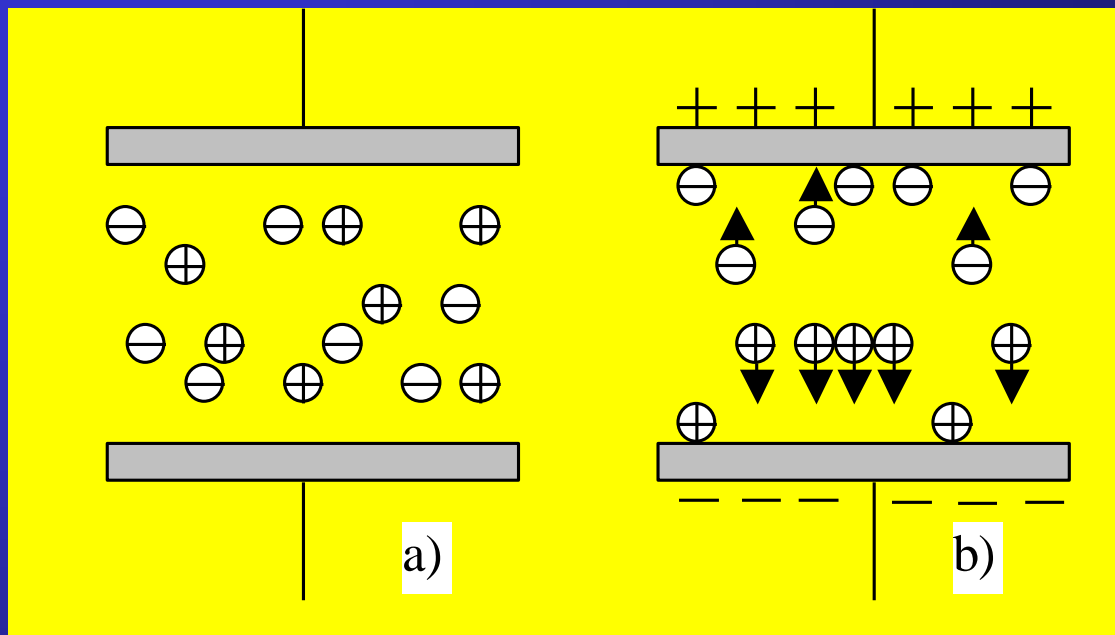
$$\begin{aligned} Q_E &= 8.4 \cdot 10^{-20} \cdot \rho_{sr} \cdot f^2 \cdot E^2 \quad [J / \text{min}] \\ Q_H &= 8.4 \cdot 10^{-16} \cdot \rho_{sr} \cdot f^2 \cdot H^2 \quad [J / \text{min}] \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_{sr}$  - średnia rezystancja właściwa

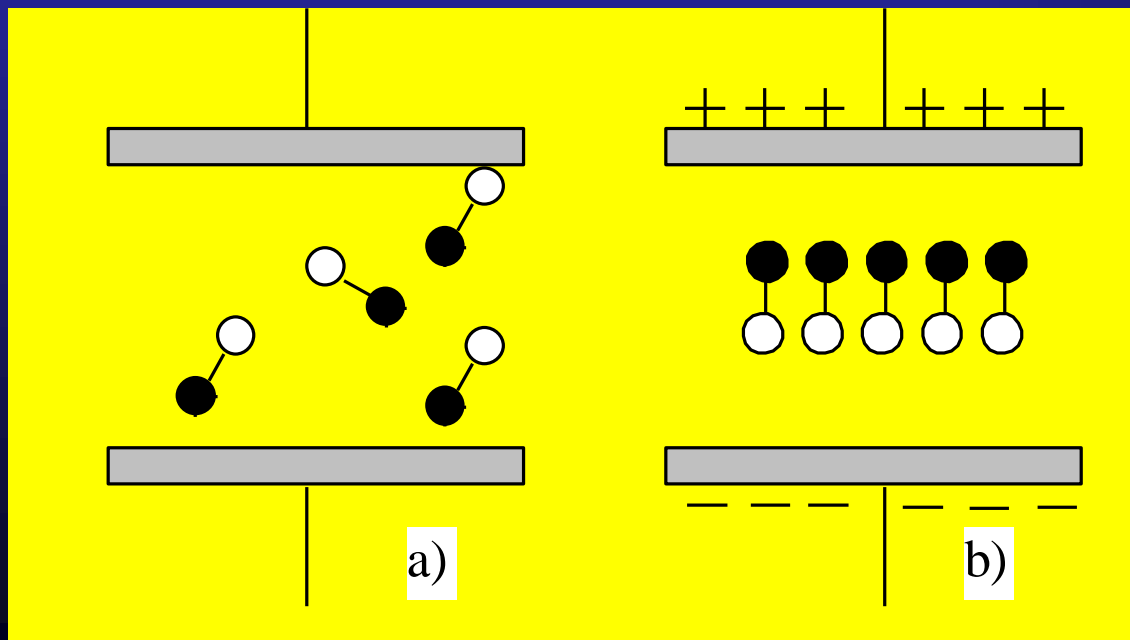
Część strat w wartości energii ogólnej pochłanianej przez ciało rośnie ze wzrostem częstotliwości. W szczególności straty na relaksację cząsteczek wody w tkankach wzrastają z 50% przy częstotliwości 1GHz do 98% przy częstotliwości 30GHz.

Tkanki organizmu żywego składają się z mnóstwa komórek, zawierających płyn, oraz płynu międzykomórkowego. Środowisko wewnątrz komórek oraz między komórkami posiada rezystancję właściwą na poziomie 100 – 300  $\Omega \cdot \text{cm}$  i względną przenikalność dielektryczną o wartości  $\epsilon = 80$ . Błony komórek mają powierzchniową rezystancję właściwą do  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , ich właściwa pojemność powierzchniowa wynosi 0,1 – 3  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ . Jeśli taką tkankę umieści się w stałym polu elektrycznym, będzie się ona w różnym stopniu polaryzować: jony przemieszczą się wzdłuż linii pola w stronę biegunów przeciwległych ich ładunkom (Rys. 1), a dipole cząsteczek przyjmą orientację w tym samym kierunku (Rys. 2)





Rys.1. Ruch jonów chaotyczny (a) oraz uporządkowany (b) przy obecności PEM



Rys.2. Ruch dipoli cząsteczek chaotyczny (a) oraz uporządkowany (b) przy obecności PEM

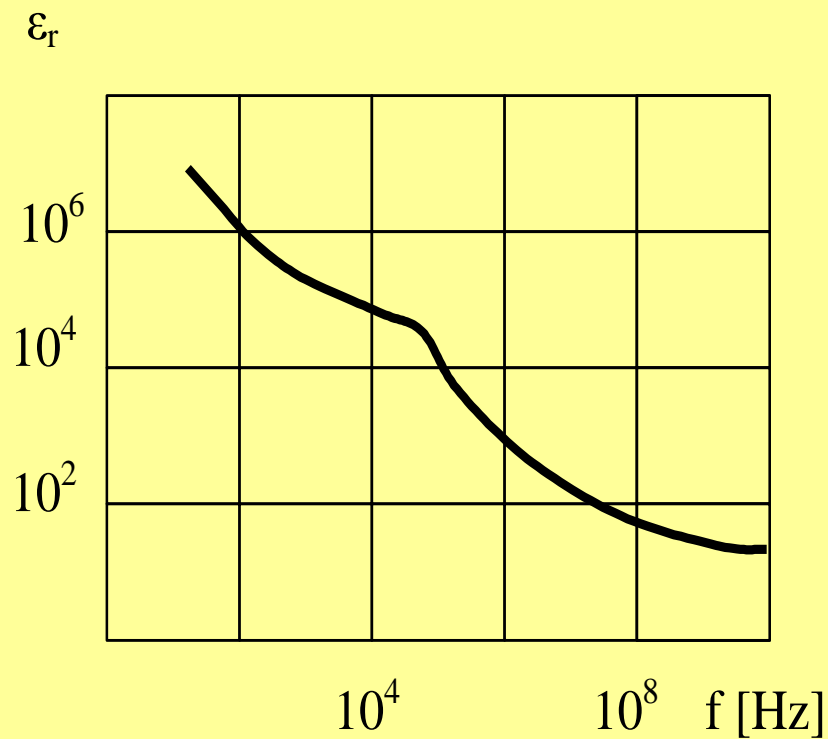
Jednak prądy jonowe będą płynąć tylko w płynie międzykomórkowym, ponieważ przy stałym napięciu błony komórek są bardzo dobrym dielektrykiem i idealnie izolują wnętrze komórki. Przy dużym napięciu możliwa jest elektroforeza, tzn. przemieszczenie dużych ładunków, nawet takich jak komórki i makrocząsteczki.

W zmiennym polu elektromagnetycznym właściwości tkanek są zależne od częstotliwości. Przy wzroście częstotliwości tkanki tracą własności dielektryczne i nabywają własności przewodników (na przykład: mięśnie przy częstotliwości 1 GHz mają  $\text{tg}\delta = 5$ ). Należy zauważyć, że zmiany te nie zachodzą równomiernie w funkcji częstotliwości (Tab. 1. oraz Rys. 3).

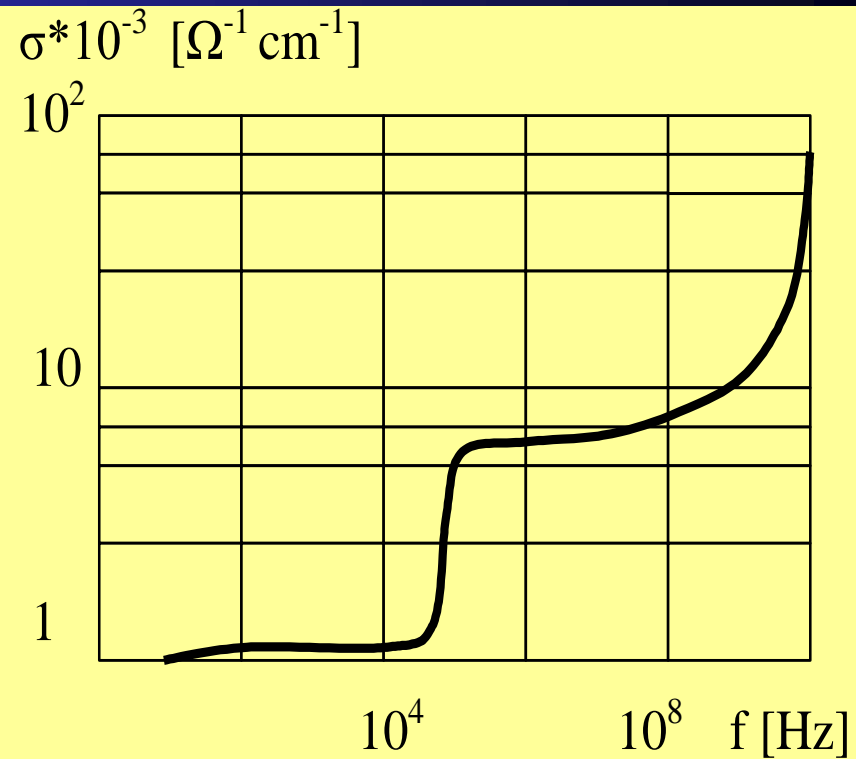
Szczególnie jest to zauważalnie dla przewodności. Do częstotliwości około  $10^4$  Hz ma miejsce płynne jednostajne zmniejszanie przenikalności  $\epsilon_r$  oraz zwiększanie przewodności  $\sigma$ . W zakresie od  $10^4$  do  $10^5$  Hz występuje gwałtowny wzrost, po którym przenikalność znów rośnie płynnie, a w zakresie od  $10^9$  do  $10^{10}$  Hz pojawia się nowy wyraźny skok.

**Tab. 1. Niektóre właściwości elektryczne tkanki człowieka oraz zwierząt na różnych częstotliwościach**

Częstotliwość	Skóra		Tkanka tłuszczowa		Mięśnie		Krew		Wątroba		Kość		Mózgowie		Szpik	
	$\epsilon_r$	$\sigma \cdot 10^{-3}$ S/cm	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$	$\epsilon_r$	$\sigma$
10 Hz					$1 \cdot 10^7$	1.04			$1.6 \cdot 10^7$	1.19						
100 Hz			$15 \cdot 10^4$		$8 \cdot 10^5$	1.12		6.03	$9 \cdot 10^5$	1.25						
1 kHz			$5 \cdot 10^4$	0.47	$1.3 \cdot 10^5$	1.25		6.03	$1.5 \cdot 10^5$	1.30				1.43		
10 kHz			$2 \cdot 10^4$		$5.5 \cdot 10^4$	1.32	$2.9 \cdot 10^3$	6.81	$5.5 \cdot 10^4$	1.46						
100 kHz					$2 \cdot 10^4$	4.76	$2.7 \cdot 10^3$	6.81	$9.5 \cdot 10^3$	2.60				1.49		
1 MHz					$2 \cdot 10^4$	5.41	$2.0 \cdot 10^3$	7.15	$1.6 \cdot 10^3$	3.17				1.79		
10 MHz						6.25	$2.0 \cdot 10^3$	11.1		4.55				2.67		
100 MHz			12.0	0.83	73.5	8.7	74.5	12.2	70	7.55			82	5.13	7.5	0.24
1 GHz	45.0	10.5	4.6	0.91	54.0	12.1	63.0	12.5	48	10.42	8.0	0.5			6.0	0.61
10 GHz	35.5	87.0	3.6	4.77	29.0	76.9	45.0	115.2	36	62.5	6.6	7.7			5.8	10.0
24 GHz	23.0		3.4	14.1			32.0	263.2			6.3	14.1				



a)



b)

Rys. 3. Zależność przenikalności elektrycznej (a) oraz przewodności (b) tkanki mięśniowej od częstotliwości

## Zjawisko to można wyjaśnić następująco:

1. Przy bardzo niskich częstotliwościach dla tkanek żywych możliwa jest tylko przewodność jonowa. Z powodu dobrych właściwości izolacyjnych komórek ich zawartość nie uczestniczy w tworzeniu prądów. Dlatego przewodność tkanki jest niska. W tym samym czasie częstotliwość jest jeszcze na tyle mała, że błony komórkowe zdążają w ciągu jednego okresu naładować się kosztem jonów z zewnątrz i z wewnątrz komórek. Cały ładunek jest duży i pojemność tkanki jest znacząca, co sprawia, że przenikalność elektryczna jest duża. Jednak ze wzrostem częstotliwości rezystancja pojemnościowa błon stopniowo zmniejsza się, błony nie nadążają naładować się całkowicie, płyn wewnątrz komórek zaczyna uczestniczyć w procesie tworzenia prądów jonowych i w wyniku tego przewodność tkanki płynnie zwiększa się, a przenikalność elektryczna zmniejsza się.

Przy częstotliwościach od  $10^4$  do  $10^5$  Hz skok przewodności odbywa się kosztem lawinowego włączania środowiska wewnątrz komórek w proces wytwarzania jonów. Oprócz tego polaryzacja cząsteczek tkanki (generalnie cząsteczek wody) powoduje powstawanie prądów przemieszczenia (co zwiększa ogólny prąd w tkankach).

2. Przy częstotliwościach  $10^5 - 10^9$  Hz okres drgań staje się krótszy, błony ładują się słabo, rezystancja pojemnościowa zmniejsza się, zarazem zmniejsza się rezystancja powierzchniowa, zawartość komórek aktywnie uczestniczy w wytwarzaniu prądów jonowych. Czyli przewodność rośnie, a przenikalność elektryczna zmniejsza się. Jednocześnie znacznie wzrasta polaryzacja cząsteczek i związane z nią prądy przemieszczenia.

3. Przy częstotliwościach  $10^9 - 10^{10}$  Hz i więcej polaryzacja cząsteczek i prądy przemieszczenia mają przewagę. Oprócz tego w tym zakresie częstotliwości zdarzają się zjawiska rezonansowe (częstotliwości charakterystyczne cząsteczek wody oraz białkowych cząsteczek krwi leżą w tym zakresie). W wyniku tego przewodność szybko rośnie.

W ten sposób ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego oprócz zmian właściwości tkanek, indukowanie prądów jonowych stopniowo zmienia polaryzację cząsteczek. Na przykład: straty elektryczne w tkankach przy częstotliwości 1GHz sięgają 50% strat ogólnych, a przy częstotliwościach 10 GHz oraz 30 GHz – odpowiednio około 90% i 98%.

Pochłaniana energia pola elektromagnetycznego jest zamieniana w energię ciepłą. Przy częstotliwościach do 10 MHz rozmiary ciała człowieka są małe względem długości fali. Procesy dielektryczne w tkankach są słabe. Dlatego ciało człowieka można rozpatrywać jako jednorodną elipsę przewodzącą. Energia pochłaniana przez ciało może być oszacowana przy pomocy wzoru:

$$P_p = i^2 / \sigma_{sr} \quad \text{W/cm}^2 \quad (2)$$

gdzie:  $i$  – prąd jonowy indukowany w ciele (A);

$\sigma_{sr}$  – średnia przewodność właściwa ciała (S/cm).

Jeśli duża (wzdłużna) oś ciała jest równoległa do linii pola, w ciele indukują się największe prądy, gęstość których (w poprzek ciała) można obliczyć ze wzorów:



$$\begin{aligned} j_E &= 1,3 \cdot 10^{-13} f \cdot E, \\ j_H &= 1,3 \cdot 10^{-11} f \cdot H \end{aligned} \quad \text{A/cm}^2 \quad (3)$$

Jeśli długość fali jest porównywalna z wymiarami ciała oraz grubością warstw tkanek, wtedy znaczące stają się straty elektryczne w tkankach i ciała nie można już uważać za jednorodne. Oprócz tego konieczne jest uwzględnienie odbicia energii pola przez powierzchnię ciała.

## 2. Odbicie energii na granicy „powietrze – tkanka”.

Powoduje zmniejszenie oddziaływania ciepła w sposób prawie identyczny dla wszystkich częstotliwości od 100 MHz do 24.5 GHz.

Pochłaniana energia może być oszacowana przy pomocy wzoru:

$$P_p = P_0(1 - \rho) \cdot e^{-2k''r} \quad (4)$$

gdzie:  $P_0 = I_0 S_{sk}$  - energia padająca na ciało,

$\rho$  - współczynnik odbicia na powierzchni skóry (Tab.2),

$S_{sk}$  - skuteczna powierzchnia ciała.

Tab.2. Współczynnik odbicia na powierzchni skóry

Powierzchnia	Długość fali [cm]						
	300	150	75	30	10	3	1.23
Powietrze - skóra	0.758	0.684	0.623	0.570	0.550	0.530	0.47
Skóra - tłuszcz	0.340	0.277	-	0.231	0.190	0.230	0.22
Tłuszcz - mięśnie	0.355	0.352	0.300	0.261	-	-	-

Skuteczna powierzchnia ciała człowieka jest funkcją częstotliwości pola i może istotnie różnić się od powierzchni rzutu ciała człowieka na płaszczyznę prostopadłą do fali padającej. Na przykład: eksperymentalnie określono, że w zakresie długości fal 3.2 – 73 cm skuteczna powierzchnia przyjmuje wartości od 0.1 do 3.8 płaszczyzny rzutu. Jeśli płaszczyzna polaryzacji fali jest równoległa do dużej osi ciała, wtedy skuteczna powierzchnia jest 1.5 – 2 razy większa, niż w przypadku prostopadłej orientacji wzajemnej płaszczyzny polaryzacji i dużej osi ciała.

Obliczenia przy pomocy wzoru (4) są skomplikowane, gdyż:

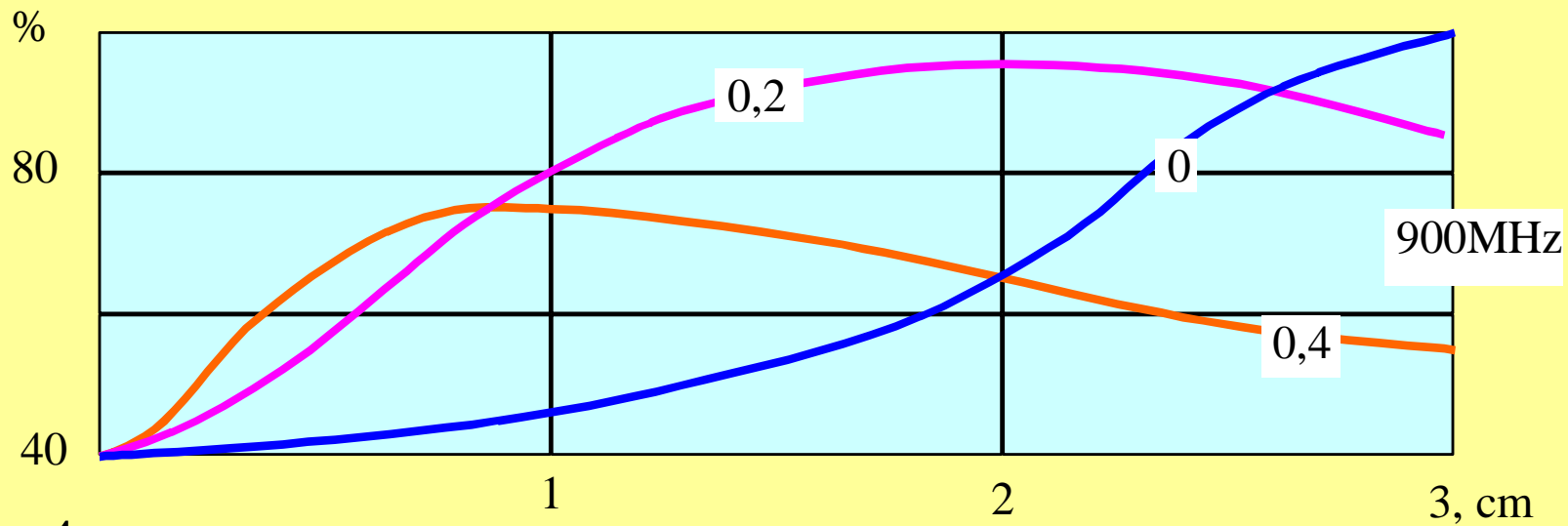
- powierzchnia ciała człowieka nie jest płaska, dlatego odbicia od różnych punktów ciała są niejednakowe,
- w wielowarstwowej strukturze ciała człowieka z różnymi grubościami tkanek w różnych miejscach odbywają się wielokrotne odbicia i załamania przechodzącej fali. Fala jest tłumiona i pochłaniana w tkankach niejednakowo. Stąd niejednakowe oddziaływanie na różne tkanki.

W tabeli 3 podane są obliczone wartości głębokości wnikania fal radiowych w niektóre tkanki.

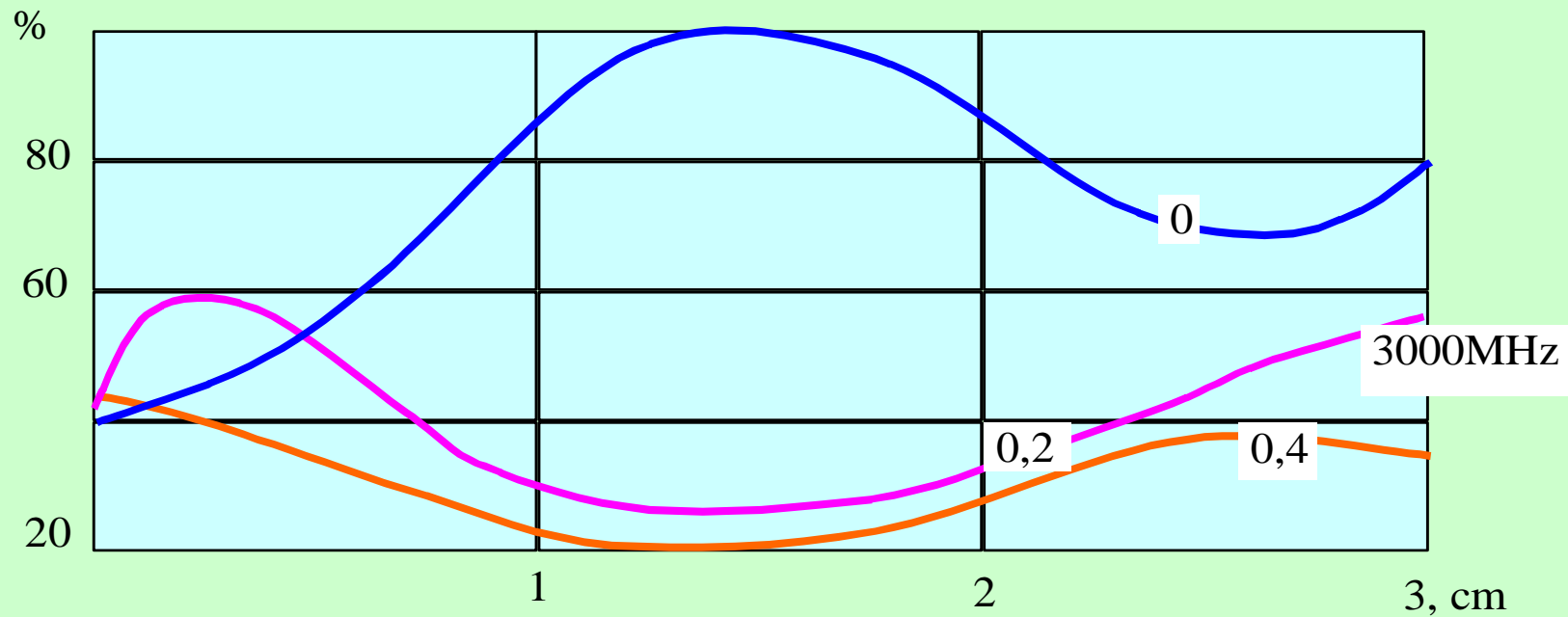
Faktycznie pochłaniana przez ciało energia pola może istotnie różnić się od oszacowanej przy pomocy wzoru (4) dlatego, że tłuszczowa warstwa podskórna może odgrywać rolę transformatora ćwierćfalowego, dopasowującego rezystancję falową powietrza i tkanki mięśniowej. Część energii przenikającej do wnętrza ciała może znacznie się zwiększyć. Zjawisko to zależy od grubości warstwy tłuszczu, skóry oraz częstotliwości pola (Rys. 4, grubość skóry: 0, 0.2, 0.4 cm)

Tab. 3. Obliczone wartości głębokości wnikania fal radiowych w niektóre tkanki.

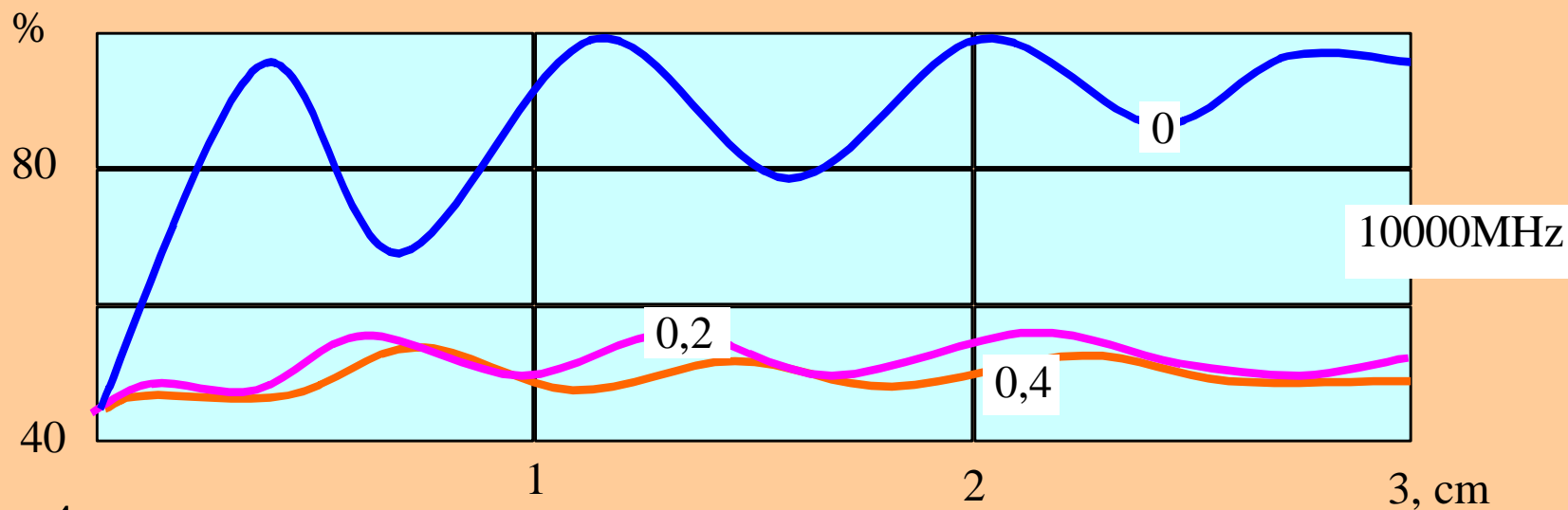
Rodzaj tkanki	Długość fali [cm]							
	300	150	75	30	10	3	1.23	0.9
Skóra	3.765	2.78	2.18	1.638	0.646	0.189	0.0772	
Tłuszcz	20.45	12.53	8.52	6.42	2.45	1.1	0.342	
Mięśnie	3.454	2.32	1.84	1.456		0.134		
Krew	2.86	2.15	1.787	1.40	0.78	0.148	0.0598	0.0272
Soczewka oka	9.42	4.39	4.23	2.915	0.50	0.174	0.0706	0.0378
Ciało szkliste oka	2.17	1.69	1.41	1.23	0.535	0.195	0.045	0.0315
Mózgowie	3.56	4.132	2.072	1.933	0.476	0.168	0.075	0.0378
Szypik	22.9	20.66	18.73	11.9	9.924	0.34	0.145	0.0730



Rys.4a



Rys.4b



Rys.4c

Na przykład: dla fali o długości 10cm warstwa podskórna tłuszczu o grubości około 9 mm może być takim transformatorem. Dzieje się tak dlatego, że promieniowanie o długości fali 10 – 30 cm jest pochłaniane w szerokim paśmie – od 20 do 100% - w skórze, tłuszczu oraz w mięśniach.

Przy długości fali 30 – 100 cm pochłanianie wynosi 30 – 40%, ale generalnie w organach wewnętrznych. Dlatego promieniowanie takie jest najbardziej szkodliwe.

Promieniowanie fal o długości mniejszej od 10 cm generalnie jest pochłaniane przez warstwy skóry. Z punktu widzenia oddziaływania termicznego jest to najmniej szkodliwy przypadek, ponieważ z jednej strony nadmiar ciepła od razu jest odczuwalny oraz z drugiej strony ciepło jest rozpraszane i odprowadzane jednocześnie na zewnątrz i w głąb ciała.

Powstała w tkankach ciała człowieka energia cieplna zwiększa ogólny poziom ciepłoty ciała. Jeśli mechanizm regulacji ciepła w organizmie jest zdolny do rozpraszania nadmiaru ciepła, temperatura ciała pozostaje stała. W innym przypadku jest możliwe podwyższenie temperatury ciała. W tym przypadku podwyższenie temperatury ciała o 1 °C jest niedopuszczalne. W tabeli 4 są podane minimalne intensywności promieniowania fal o różnych częstotliwościach, które wywołują efekt cieplny.



**Tab. 4. Minimalne intensywności promieniowania fal o różnych częstotliwościach wywołujące efekt cieplny**

<b>Częstotliwość (długość fali)</b>	<b>Natężenie pola</b>
<b>500 kHz</b>	<b>8000 V/m</b> <b>160 A/m (17 W/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>14,83 MHz</b>	<b>2500 V/m (1.7 W/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>69.7 MHz</b>	<b>200 V/m (11 mW/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>300 – 3000 MHz (fale decymetrowe)</b>	<b>40 mW/cm<sup>2</sup> (380 V/m)</b>
<b>3 GHz (10 cm)</b>	<b>10 mW/cm<sup>2</sup> (190 V/m)</b>
<b>10 GHz (3 cm)</b>	<b>5 – 10 mW/cm<sup>2</sup> (135 – 190 V/m)</b>
<b>30 –300 GHz (mm)</b>	<b>7 mW/cm<sup>2</sup> (170 V/m)</b>

Jak widać z tabeli 4 natężenie promieniowania zmniejsza się wraz ze zwiększaniem częstotliwości (współczynnik pochłaniania energii jest wprost proporcjonalny do częstotliwości, a także przewodności właściwej oraz przenikalności elektrycznej ośrodka (tkanki żywego organizmu), która z kolei jest funkcją częstotliwości).

Niektóre organy oraz tkanki ciała człowieka posiadają słaby mechanizm termoregulacji (z powodu niewielkiej liczby naczyń krwionośnych znajdujących się w nich lub mniejszego krwioobiegu) . Dlatego są one bardzo czułe na promieniowanie. Do takich tkanek i organów należą: mózg, oczy, nerki, jelito, pęcherz żółciowy oraz moczowy, jądra. Te ostatnie są najbardziej wrażliwe na oddziaływanie fal centymetrowych: w tym przypadku próg cieplny wynosi  $5 \text{ mW/cm}^2$  .

Badania pokazują, że wpływ pola elektromagnetycznego o dużych i bardzo dużych częstotliwościach na organizmy żywe ujawnia się przy znacznie mniejszych natężeniach niż próg cieplny. Czyli istnieje również nietermiczne oddziaływanie pól. Przypuszcza się, że są to skutki niektórych mikroprocesów, które przebiegają pod wpływem pól.

Pierwszy taki proces polega na tym, że erytrocyty i leukocyty krwi ustawiają się w szeregi równoległe do kierunku pola elektrycznego, skutkiem czego zmienia się kształt i właściwości tkanek.

Drugi proces określa się jako polaryzację wiązań bocznych makrocząsteczek tkanek oraz ich orientację równoległe do linii sił pola elektrycznego, co może powodować zerwanie wewnątrz- oraz między- cząsteczkowych związków, koagulację cząsteczek i zmianę ich właściwości.

Trzeci proces jest uwarunkowany oddziaływaniem siły Lorenca i polega na tym, że dodatnie i ujemne jony w elektrolitach tkankowych przemieszczają się prostopadłe do pola elektrycznego. W wyniku czego skład chemiczny oraz równowaga elektrolityczna tkanek zostają naruszone.

Czwarty proces - wcześniej omówione zjawisko rezonansowe pochłaniania energii.

Warto zauważyć, że oddziaływania nietermiczne ujawniają się przy bardzo małych poziomach natężenia promieniowania i nie wzrastają z jego zwiększeniem.

Nietermiczne oddziaływanie pól elektromagnetycznych ujawnia się przy natężeniach wyższych od progu termicznego. To potwierdza fakt, że przy jednakowej ilości ciepła, wytwarzanego w powierzchniowych tkankach zwierząt, fale centymetrowe i milimetrowe oddziałują znacznie silniej, niż promieniowanie podczerwone: temperatura napromieniowanej części ciała oraz całego ciała podwyższa się o większą wartość.

Negatywne oddziaływanie pól elektromagnetycznych wywołuje różne zmiany, które mogą być odwracalne, a przy dużych natężeniach promieniowania lub przy systematycznym promieniowaniu z małym poziomem, ale wyższym od najwyższych dopuszczalnych, mogą być nieodwracalne. Zmiany te mogą być morfologiczne, czyli dotyczące budowy i wyglądu zewnętrznego tkanek oraz organów ciała człowieka. Są to oparzenia, martwica, krwotoki itd., aż do zmian struktury komórek, w najcięższych przypadkach. W innych przypadkach mogą wystąpić zmiany odwracalne naczyń, brak odżywiania tkanek, organów lub organizmu w ogóle.

Zmiany morfologiczne często obserwuje się w tkankach obwodowego oraz centralnego układu nerwowego. Zaburzają one funkcje regulacyjne, wywołując zakłócenia związków nerwowych w organizmie lub nawet zmiany struktury samych komórek nerwowych. Ten charakter zmian morfologicznych układu nerwowego obserwuje się przy oddziaływaniu pól o różnych częstotliwościach, nawet przy stałym polu magnetycznym. Wyrazistość zmian jest różna:

- dla fal milimetrowych są one lokalne, mają wygląd ognisk,
- dla fal centymetrowych koncentrują się wokół naczyń mózgu,
- fale decymetrowe i dłuższe wywołują także zaburzenia w odżywianiu tkanek, organów oraz organizmu.

Największy wpływ na układ nerwowy mają **fale decymetrowe**. Szeregując według zmniejszania się skutków, kolejne są fale centymetrowe, dekametrowe, metrowe, milimetrowe oraz reszta.

Bardzo widoczne i poważne są zmiany morfologiczne, które mogą zachodzić w gałce ocznej. Mogą spowodować w bardzo ciężkich przypadkach kataraktę, czyli zmętnienie soczewki. Zmiany te powstają dla różnych długości fali oddziałującego promieniowania – od 3 cm do 20 m. Pojawiają się zarówno przy krótkotrwałym promieniowaniu o dużym natężeniu (setki  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ), jak i przy długookresowym (kilka lat) o natężeniu kilka  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , czyli poniżej progu termicznego. Impulsowe promieniowanie okazuje się bardziej niebezpieczne dla oczu, niż ciągłe.

Zmiany morfologiczne we krwi objawiają się w zmianach jej składu oraz świadczą o największym wpływie fal centymetrowych i decymetrowych.

Innym rodzajem zmian, wywołanych oddziaływaniem pól elektromagnetycznych są zmiany funkcji regulacyjnych układu nerwowego, co objawia się w postaci zaburzeń:

- a) wcześniej wyuczonych odruchów warunkowych;
- b) charakteru i intensywności fizjologicznych i biologicznych procesów w organizmie;
- c) funkcjonowania rozmaitych części układu nerwowego;
- d) regulacji nerwowej układu sercowo-naczyniowego.

Co do ostatniego zaburzenia. Oddziaływanie pola elektromagnetycznego o różnych częstotliwościach wywołuje typowe zmiany funkcji tego układu: obniżenie ciśnienia krwi (hipotonia), spowolnienie rytmu skurczów serca (bradykardia) oraz zmniejszenie wewnętrznej przewodności. W tabeli 5 są podane wartości uzyskane w wyniku przeprowadzenia badań, które świadczą o największym wpływie fal centymetrowych. Oczywiście są one uzależnione od bezpośredniego wpływu na powierzchniowe zakończenia nerwowe – receptory ciała człowieka: ich podrażnienie lub zmiany stanu funkcjonalnego.



Tab. 5. Procentowy udział wypadków spowodowanych promieniowaniem

Parametry pola		% wypadków		
Częstotliwość	Natężenie	Hipotonia	Bradykardia	Przewodność wewnętrzna
Pod wpływem pola				
Mikrofale (cm)	< 1 mW/cm <sup>2</sup>	28	48	25
Bardzo wysoka	Poniżej progu	17	24	42
Wysoka	Setki V/m	3	36	-
Średnia	Do 1000 V/m	17	15	-
Bez wpływu pola		14	3	2

Skutkiem oddziaływania impulsowych pól centymetrowych może być także zaburzenie naturalnych przebiegów bioelektrycznych w organizmie. Wiadomo, że w organizmie człowieka istnieją niskoczęstotliwościowe bioprądy. Wiadomo także, że serce człowieka generuje pole o częstotliwości od 30 do 700 Hz, a mózg – o częstotliwości 200 – 500 Hz. Niektóre elementy organizmu mają właściwości detektorów. Gdy człowiek znajdzie się w strumieniu drgań zmodulowanych, w organizmie mogą wytworzyć się prądy z częstotliwością modulacji. Gdy częstotliwości te są równe lub są wielokrotnością częstotliwości bioproudów, bioprądy mogą zostać zniekształcone, co spowoduje zaburzenie normalnego funkcjonowania organizmu.

Podczas obsługi radarów dookolnej obserwacji, personel stacji jest poddawany promieniowaniu okresowo, względem czasu obrotu radaru. Badania higieniczne (długość fali 10 cm) pokazały, że:

- a) przy różnych gęstościach strumienia mocy, ale przy jednakowej ilości energii pochłanianej przez organizm, skutki termiczne dla promieniowania okresowego są mniejsze, niż dla ciągłego i to tym mniejsze, im mniejszy jest stosunek czasu promieniowania do przerwy;
- b) wyrazistość zmian odruchów warunkowych w wyniku promieniowania okresowego jest prawie taka sama lub nieco większa w porównaniu z promieniowaniem ciągłym.

Trwałe, systematyczne oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizm człowieka, szczególnie dla częstotliwości wysokich i bardzo wysokich, przy natężeniu pola przekraczającym najwyższy dopuszczalny poziom może spowodować niektóre zmiany funkcjonalne, w pierwszej kolejności układu nerwowego. Objawiają się one bólami głowy, zaburzeniami snu, podatnością na zmęczenie, drażliwością itd. Pola mikrofalowe o małych natężeniach (znacznie niższych od dopuszczalnych) mogą powodować osłabienie systemu nerwowego. Zmiany układu sercowo-naczyniowego objawiają się hipotonią, bradykardią oraz zmniejszeniem przewodności wewnętrznej, można je także zaobserwować w zmianach składu krwi, zmianach w wątrobie i śledzionie. Przy czym wszystkie zmiany są bardziej widoczne dla wyższych częstotliwości.

Zaburzenia funkcjonalne, wywołane biologicznym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego, mogą się kumulować, ale są odwracalne, gdy oddziaływanie ustaje.

Stopień ryzyka związanego z promieniowaniem elektromagnetycznym dla częstotliwości od 60 kHz do 300 MHz ilościowo ustala się przez określenie dopuszczalnego natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Określono następujące Najwyższe Dopuszczalne Natężenia Pól:

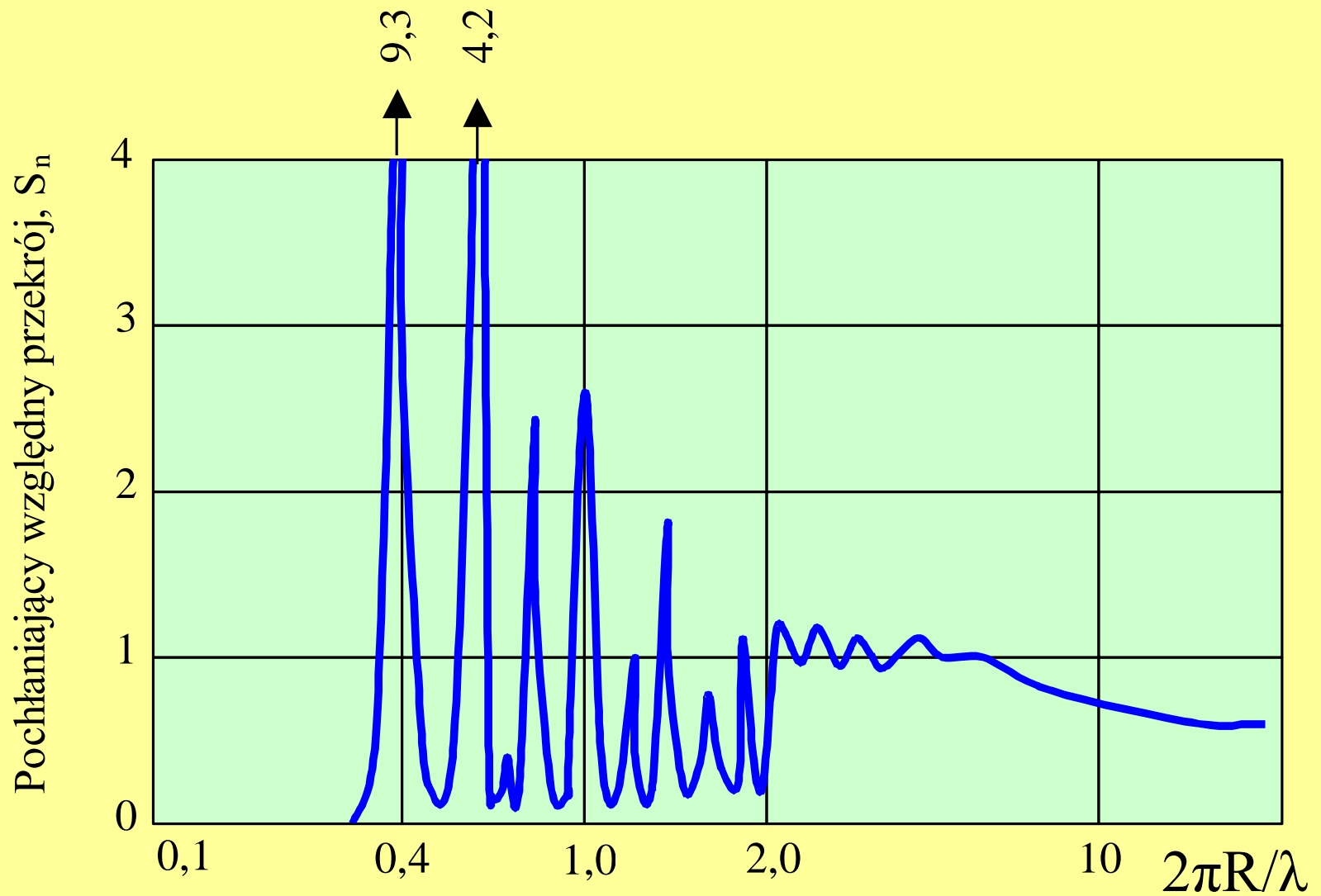
- a) elektrycznego - 20 V/m dla częstotliwości od 60 kHz do 30 MHz  
- 5 V/m dla częstotliwości od 30 do 300 MHz;
- b) magnetycznego - 5 A/m dla częstotliwości od 100 kHz do 1.5 MHz.

Stopień ryzyka związanego z promieniowaniem elektromagnetycznym dla częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz ilościowo ustala się poprzez podanie natężenia promieniowania (w postaci gęstości strumienia mocy). I tak Najwyższe Dopuszczalne Natężenia mikrofal w miejscu pracy wynoszą:

- promieniowanie w ciągu całego dnia –  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ;
- promieniowanie w ciągu do 2 godzin w czasie dnia -  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , przez resztę czasu - nie więcej niż  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ;
- promieniowanie w ciągu 15-20 min w czasie dnia –  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  przy obowiązkowym wykorzystywaniu okularów ochronnych, przez resztę czasu – nie więcej niż  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ;

### 3. Współmierność ciała człowieka do długości fali

Powoduje powstawanie istotnej zależności częstotliwościowej oddziaływania pola z ciałem. Przykład takiej zależności dla najprostszego przypadku – półprzezroczystej kuli - jest pokazany na rys. 5.



Rys. 5. Pochłanianie energii fali płaskiej ( $\lambda=10.4$  cm) w półprzezroczystej kuli ( $\epsilon' = 60$ ,  $\sigma = 0,1$  S/m) w zależności od stosunku promienia kuli  $R$  do długości fali  $\lambda$ .

Z rysunku widać, że zmiany średnicy tylko o 10...15% mogą zmieniać pochłaniający względny przekrój kuli S (stosunek mocy pochłanianej w półprzezroczystej kuli do mocy padającej na jej przekrój pionowy dla fali płaskiej w powietrzu) o kilkadziesiąt razy. Jeśli  $d \ll \lambda$  (strefa Rayleigh), wtedy ze zwiększeniem obiektu pochłaniana przez niego energia wzrasta proporcjonalnie do jego promienia w czwartej potęgę.

**Wniosek: bardzo duża zależność skutków promieniowania dla ciała człowieka od polaryzacji oraz kąta padania fali elektromagnetycznej.**

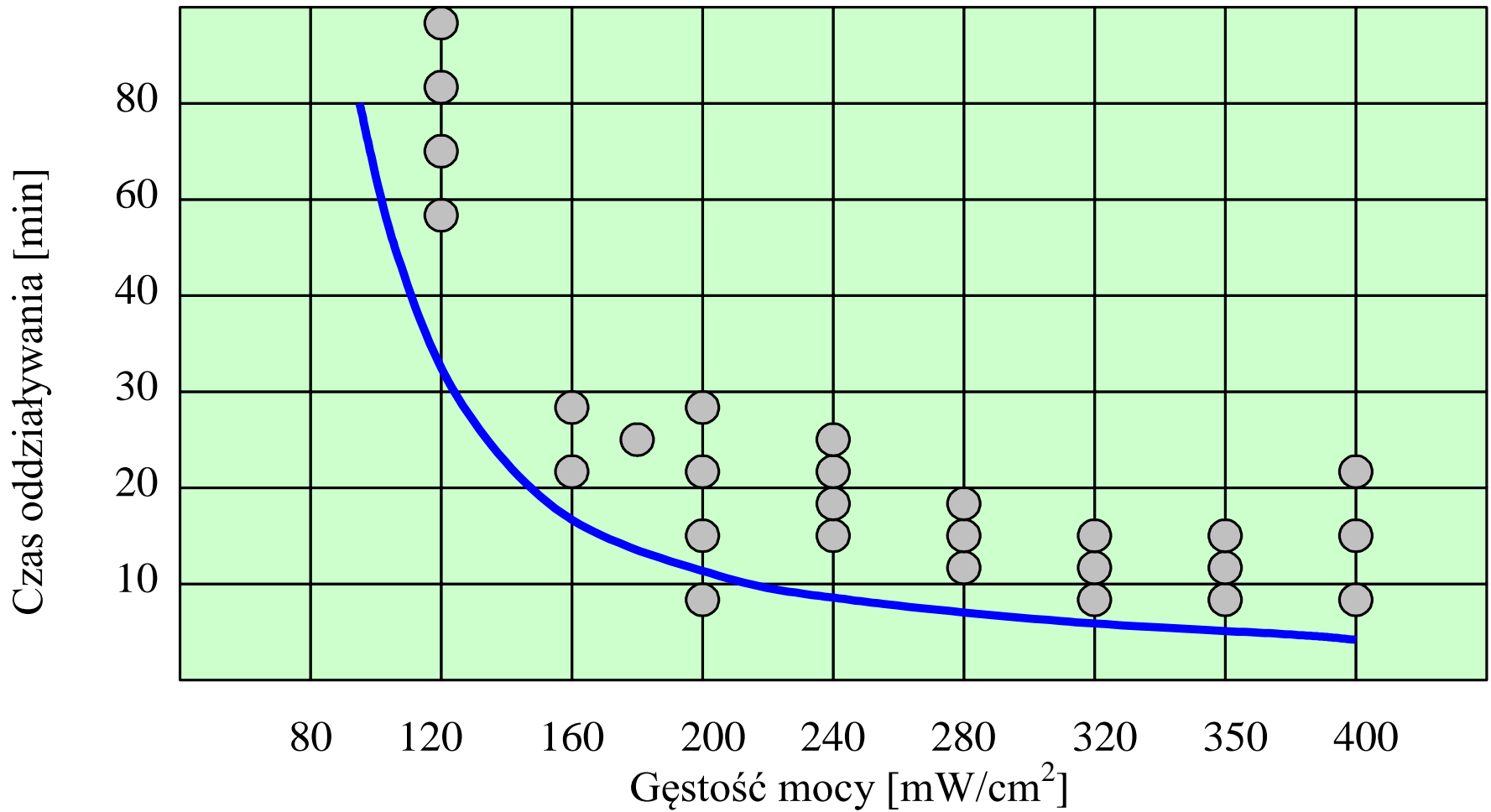


## 4. Skuteczność odprowadzania ciepła z tkanek

W wyniku złego odprowadzania ciepła z niektórych tkanek (oczy oraz jądra – mają bardzo mało naczyń krwionośnych) są one najbardziej narażone na promieniowanie.

Na przykład, po napromieniowaniu oka królika energią o gęstości od 0.12 do 0.6 W/cm<sup>2</sup> wytwarza się katarakta po czasie promieniowania od 270 do 5 min (Rys. 6). Temperatura wewnątrz oka wzrasta o 4...16°C (krytyczne dla oka jest podwyższenie temperatury o 10°C).

Wysoka wrażliwość jąder na promieniowanie jest związana z faktem, że przy nagraniu tylko o 1°C następuje częściowa lub pełna, czasowa sterylizacja. Minimalna dopuszczalna wartość gęstości mocy promieniowania dla jąder (przy trwałym oddziaływaniu) wynosi 5 mW/cm<sup>2</sup>.



Rys. 6. Progowe wartości gęstości mocy dla różnego czasu trwania promieniowania jednokrotnego oczu królika przy częstotliwości 2450 MHz.

## Specyficzne oddziaływanie mikrofal

Niezależnie od tego, że przypuszczenie o specyficznym oddziaływaniu fal radiowych sformułowano jeszcze w połowie lat czterdziestych, do 1952 roku nie było potwierdzeń eksperymentalnych. Badanie oddziaływań specyficznych i obecnie jest bardzo skomplikowanym zagadnieniem, ponieważ zmiany objawiają się zazwyczaj tylko pośrednio. Zmiany te przyjęto wyjaśniać kilkoma przyczynami. Są to:

- obecność w środowisku biologicznym **„mikroprocesów”**, czyli zjawiska „łańcuszka perłowego” (ustawiania się w szeregi cząstek niektórych substancji, w tym leukocytów oraz erytrocytów, równoległe do kierunku pola elektrycznego),
- **„nasylenie dielektryczne”** w roztworach białka (powoduje rozerwania wewnątrz- i międzymolekularnych wiązań),
- **udział siły Lorenca** (powoduje umieszczenie w elektrolicie dodatnich i ujemnych jonów w kierunku prostopadłym do pola magnetycznego).

Największe zainteresowanie wzbudzają zjawiska, związane z pochłanianiem rezonansowym pola elektromagnetycznego przez cząsteczki białka. Z tym zjawiskiem jest związane ***mutagenne oddziaływanie mikrofal.***

Wraz z komplikacją substancji biologicznej komplikują się przebiegi oddziaływania wzajemnego z polem elektromagnetycznym. Na przykład, dla wyjaśnienia czułości (wrażliwości) komórek nerwowych należy prawdopodobnie uwzględnić następujące mechanizmy oddziaływania:

- ✓ detekcja PEM w błonie komórki nerwowej;
- ✓ wpływ PEM na ruchliwość jonów, szczególnie na zdolność przenikania przez błonę komórki nerwowej;
- ✓ zmiany gradientu potasowego środowiska wewnątrzkomórkowego;
- ✓ „uporządkowanie” drgań jonów pod wpływem pola, powodujące zmiany właściwości i czułości receptorów;
- ✓ wpływ na częstotliwości własne.

Wraz z rozwojem i komplikacją organizmu oprócz najprostszych mechanizmów fizykochemicznych coraz większy wpływ na organizm wywierają czynniki, które przyjęto nazywać fizjologicznymi oraz biofizycznymi mechanizmami oddziaływania, łącznie z **aspektem informatycznym** mikrofal. Te i inne, bardziej skomplikowane przebiegi, które jeszcze są nie do końca wyjaśnione, określają skutki wtórne oddziaływania mikrofal, zazwyczaj zachodzące na poziomach energii docieplnych. Są to – **kumulacja, stymulacja, sensybilizacja**, wynikające ze skomplikowanych zdolności systemów mogących magazynować oddziaływanie cieplne oraz informatyczne.

***Kumulacja*** – powoduje, że przy nieciągłym oddziaływaniu promieniowania sumaryczny skutek kilku sesji kumuluje się.

***Sensybilizacja*** – podwyższenie po słabym promieniowaniu wrażliwości organizmu na inne czynniki (na przykład, na silniejsze promieniowanie).

***Stymulacja*** – polepszenie pod wpływem pola ogólnego stanu organizmu lub wrażliwości niektórych jego organów.

Na przykład, na poziomach energetycznych na granicy poziomów dopuszczalnych obserwuje się oddziaływanie stymulujące mikrofal: polepszenie czułości wzroku człowieka, lepszą adaptację do ciemności (przy większych energiach brak tego efektu). Niektóre reakcje całego organizmu na mikrofałe można opisać w następujący sposób: wrażliwość organizmu zaczyna się na poziomach o wartościach średnich (od  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  do kilku  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ), kiedy występuje i pogłębia się faza przygnębenia. Dalej występuje faza stymulacji, a w końcu przy gęstościach powyżej  $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$  znów występuje przygnębenie.

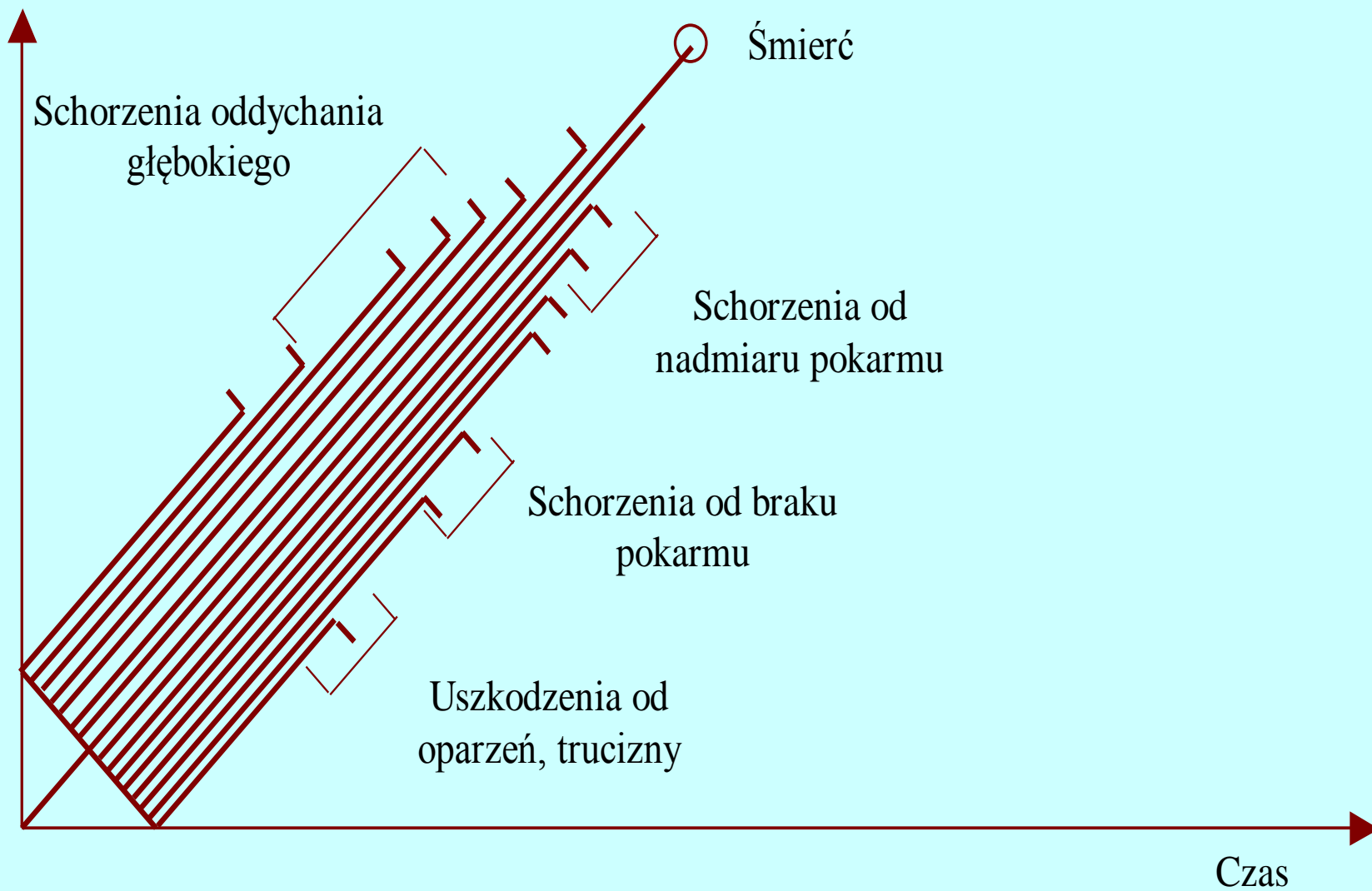
Stosunkowo niedawno wykryto oddziaływanie ***dezadaptacyjne*** mikrofal, czyli obniżenie zdolności przystosowania się organizmu do innych oddziaływań, w szczególności do szumu, promieniowania rentgenowskiego, wpływu termicznego (związanego z PEM).

Dlaczego organizm w ciągu rozwoju ewolucyjnego nie wyrobił mechanizmów regulacji w granicach optymalnych?

Przyczyny zostały odkryte całkiem niedawno.

Zachowanie organizmu, jego działalność jest podporządkowana nie zainteresowaniom osobnika, a zainteresowaniom gatunku. Stało się jasne, że nie stymulują się i nie mogą być stymulowane same przez siebie mechanizmy walki z czynnikami niesprzyjającymi, skutki oddziaływania których pojawiają się po *średnim okresie reprodukcji gatunku*: mechanizmy te znajdują się poza zakresem wpływu doboru naturalnego. Wewnątrz tej strefy są stymulowane mechanizmy, skierowane tylko na zwiększenie ilości potomstwa oraz zwiększenie zdolności do życia młodego organizmu i jego możliwości reprodukcyjnych. (Rys. 7 i 8).

Wiek



Śmierć

Schorzenia oddechania  
głębokiego

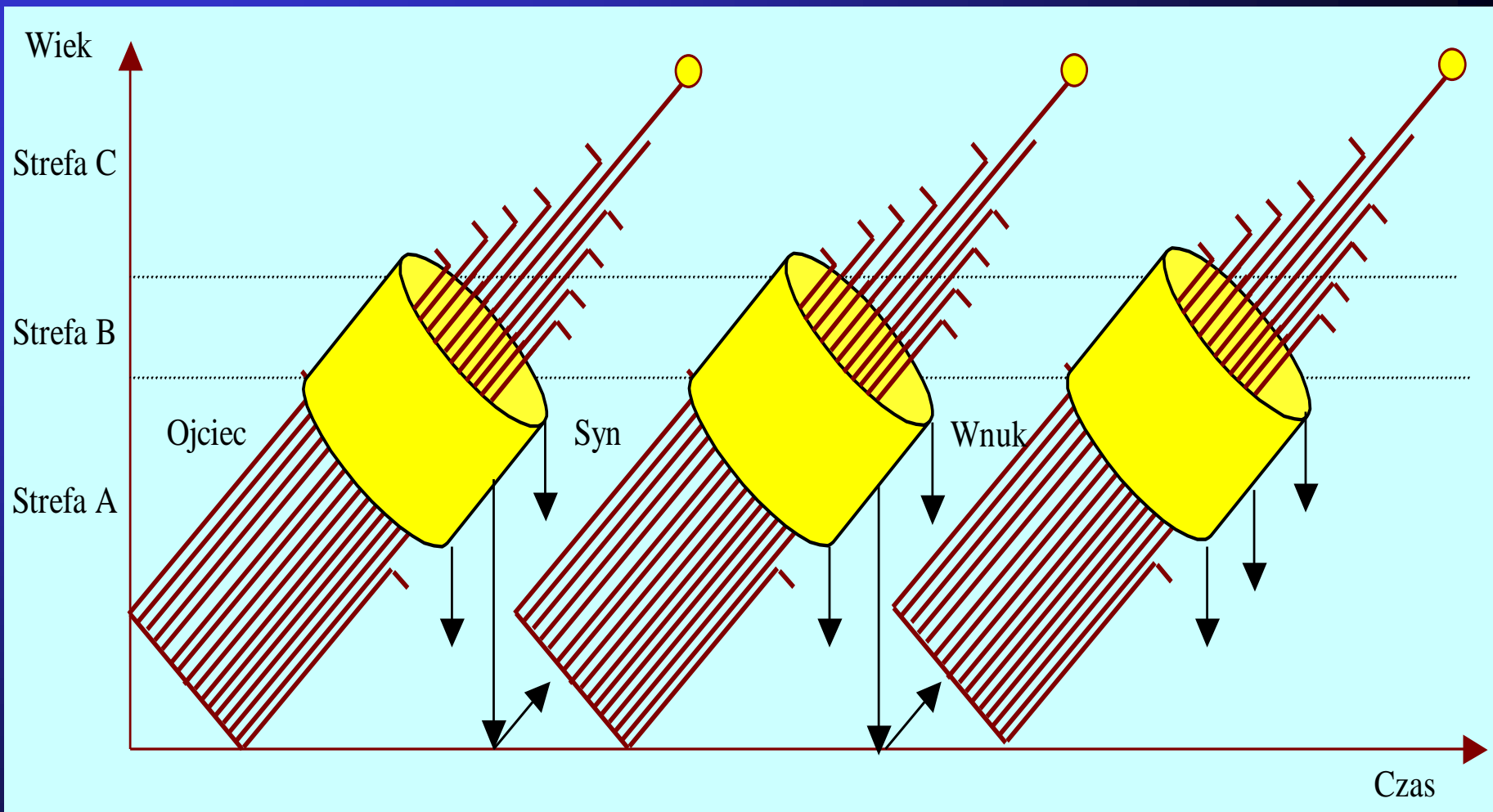
Schorzenia od  
nadmiaru pokarmu

Schorzenia od braku  
pokarmu

Uszkodzenia od  
oparzeń, trucizny

Czas





Rys.4. Strefa A – prawie pełna stabilizacja systemu;  
 Strefa B – średni okres reprodukcji gatunku ;  
 Strefa C – destabilizacja systemu.

Po średnim okresie reprodukcji gatunku organizm jest pozostawiony sam sobie i żaden z czynników (w tym oddziaływanie PEM), skutki których pojawiają się w tym okresie, nie jest włączony w sprzężenie zwrotne (ani w dodatnie, ani ujemne).

Dlatego u człowieka nie wykształciły się mechanizmy ochronne lub obronne pozwalające unikać szkodliwego promieniowania. Byłyby one bowiem zależne od naszej woli i rozumu, a nie od fizjologii. Tak jak nie unikamy wielu innych zgubnych dla organizmu czynników jak palenie papierosów i alkohol.

Teraz na poziomie biologicznym sterują nami mechanizmy, które odziedziczyliśmy po naszych dalekich przodkach, w szczególności wypracowane jeszcze w okresie panowania doboru naturalnego mechanizmy sprzężeń zwrotnych (dodatnich), skierowanych na podtrzymanie u nas wyższej aktywności do końca średniego okresu reprodukcji gatunku (linia męska).

## ***Mechanizmy doboru naturalnego nie wydają się już bezwzględnie korzystne.***

Na bazie oszacowania higienicznego promieniowania mikrofal oraz kliniczno-fizjologicznych danych o zmianach fizjologicznych pod wpływem pola elektromagnetycznego w Związku Radzieckim w 1956 roku zostało ustalone Najwyższe Dopuszczalne Natężenie pola fal 3-cm i 10-cm.

Amerykanie wychodzili z innego założenia. Za kryterium zostały przyjęte nie zmiany funkcjonalne, zazwyczaj odwracalne, a zmiany morfologiczne, czyli  $10 \text{ mW/cm}^2$  niezależnie od czasu promieniowania.

## **Metody badań oddziaływania biologicznego mikrofal.**

Do analizy i oszacowania zmian wywołanych promieniowaniem o małych natężeniach są wykorzystywane metody badań ochronno-adaptacyjnych reakcji organizmu. Dla promieniowania o dużym natężeniu – reakcji odzwierciedlających głębsze zmiany funkcjonowania organizmu. Metody te dotyczą badań centralnego układu nerwowego, układu wegetatywnego, wewnątrzwydzielniczego, hormonów, enzymów, fermentów i innych biologicznie aktywnych substancji odpowiedzialnych za funkcje regulacyjne organizmu.

**Układ nerwowy.** Przy przeprowadzaniu badań wpływu PEM na układ nerwowy szczególną uwagę poświęca się badaniom centralnego układu nerwowego, który reguluje dodatnie i ujemne sprzężenie zwrotne organizmu ze światem zewnętrznym oraz układu wewnątrzwydzielniczego, który zabezpiecza kompletność i koordynację wszystkich funkcji wewnątrz samego organizmu.

Badania funkcjonalne układu wewnątrzwydzielniczego poprzez badania krwiobiegu są przeprowadzane w postaci:

- określenie częstotliwości tętna w absolutnie spokojnych warunkach;
- próba z naciskaniem gałki ocznej („próba Aszner’a”), w wyniku której wywołuje się zwolnienie rytmu skurczy serca, obniżenie ciśnienia tętniczego;
- elektrokardiografia.

Dla pełnego zobrazowania stanu wegetatywnego układu nerwowego w nowoczesnych badaniach wykorzystuje się obserwację białego i czerwonego dermografizmu oraz histaminowej i adrenalinowej próby skórnej. Dermografizm czerwony pojawia się pod wpływem mechanicznego podrażnienia skóry ciała i jest spowodowany rozszerzeniem się naczyń krwionośnych i jest bezpośrednią reakcją naczyń włoskowatych. Podczas wykonywania próby jest mierzony czas reakcji do momentu zaczerwienienia skóry.

Następnie określa się okres zachowania zaczerwienienia, aż do zaniknięcia. Podczas badań skórnych do warstw powierzchniowych wprowadza się histaminę lub adrenalinę i obserwuje się czas reakcji, zanikanie oraz rozmiary plamy.

Dysfunkcja, czyli naruszenie funkcji wegetatywnego układu nerwowego, objawia się przez labilność (wahania) poziomu cukru we krwi, przez skłonności do podwyższenia lub obniżenia poziomu cukru po wprowadzeniu do organizmu 50...100 g cukru.

Jednym z objawów wegetatywnej nadpobudliwości mięśni jest *tremor*, czyli mimowolne, ograniczone w przestrzeni, rytmiczne i powtarzające się ruchy, drżenie palców i powiek.

Wegetatywny układ nerwowy steruje wymianą substancji w organizmie. Przez pomiar ilości pochłanianego tlenu oraz wydzielanego dwutlenku węgla określa się współczynnik oddychania i stąd przy pomocy kalorymetrycznego równoważnika tlenu można obliczyć ilość ciepła w kaloriach za 24 godziny (na czczo lub nie).

Oddziaływanie PEM mikrofal na zachowanie się zwierząt przejawia się w zmianie ogólnej aktywności ruchowej oraz w dążeniu do opuszczenia obszaru oddziaływania, a także przez zaburzenie orientacji.

Bardzo ważną metodą jest badanie składu chemicznego komórki nerwowej oraz jego zmian jakościowych i ilościowych. Analiza literatury pokazała jednak, że nie znalazła ona zastosowania, oprócz oszacowania fermentu *cholinesterazy*.

**Gruczoły wewnątrzwydzielnicze.** Hormony gruczołu wewnątrzwydzielniczego razem z wegetatywnym układem nerwowym tworzą systemy funkcjonalne, które podtrzymują normalny poziom wymiany węglowodanów, białka, minerałów i wody oraz ogólną wymianę w organizmie, czyli podtrzymują życie.

W badaniach funkcji gruczołów wydzielania wewnętrznego wykorzystuje się:

1. badanie krwi – obliczenie ilości erytrocytów, leukocytów, trombocytów, eozynofilów, oszacowanie zawartości hemoglobiny, czasu krzepnięcia krwi;
2. określenie zawartości kwasu askorbinowego w nadnerczach, z czego można wnioskować o aktywności przysadki mózgowej;
3. bezpośrednio określenie we krwi i moczu hormonów kory nadnerczy.



Badanie funkcji gruczołów płciowych zwierząt polega na badaniach dynamiki wagi jąder, ich makro- i mikrostruktury, a także stopnia zdolności do życia (wzrost, waga, trwanie życia) potomstwa zwierząt, poddanych promieniowaniu w okresie ciąży.

Poziom stanu funkcjonalnego tarczycy określa się z:

- poziomu jodyny we krwi;
- magazynowania w tarczycy i wydalania z moczem jodyny radioaktywnej;
- poziomu cukru i cholesterolu we krwi.

**Krew i limfa (chłonka).** Mimo, że do krwi są dostarczane i są z niej pobierane różne substancje, skład chemiczny jest prawie stały. Wszystkie przypadkowe wahania składu krwi w zdrowym organizmie bardzo szybko stabilizują się.

Stany patologiczne powodują większe lub mniejsze zmiany składu chemicznego krwi. Oprócz badań ilości erytrocytów, leukocytów, trombocytów, eozynofilów, oszacowanie zawartości hemoglobiny, czasu krzepnięcia krwi itd., określa się zawartość jonów Na, K, Ca, Cl, ogólną zawartość białka, cukru, cholesterolu, co pozwala sądzić o zaburzeniach przemiany elektrolitycznej, białkowej, węglowodanowej oraz tłuszczowej.

***Przemiana białkowa.*** Jednym ze wskaźników stanu przemiany białkowej jest zawartość ogólna białka we krwi oraz stosunek poszczególnych frakcji białkowych.

***Przemiana węglowodanowa.*** Zazwyczaj określa się zawartość glikogenów, cukru w krwi oraz cukru w moczu. Czasem jest badana zależność zawartości cukru we krwi po obciążeniu glukozą. Pod wpływem PEM jest możliwe zaburzenie aktywności poszczególnych systemów fermentacyjnych, które uczestniczą w rozkładzie węglowodanów.

***Przemiana tłuszczowa.*** W badaniach jest wykorzystywana metoda określenia cholesterolu, która jest oparta na reakcji barwnej (po oddziaływaniu wzajemnym bezwodnika octowego, kwasu octowego lodowego, kwasu siarkowego i cholesterolu).

***Przemiana soli mineralnych.*** Na skutek oddziaływań PEM obserwuje się zmiany w zawartości chlorków, sodu, potasu, wapnia, fosforanów. Sód i potas określa się metodą fotometrii.

***Przemiana witamin.*** Obniżenie zawartości witamin (szczególnie witaminy C oraz B<sub>1</sub>) określa się metodą fluorymetryczną.

***Fermenty.*** Spośród metod określenia aktywności *cholinesterazy* we krwi jest ręczna metoda kalorymetryczna, oparta na oszacowaniu intensywności reakcji barwnej w świetle monochromatycznym.

**Wnioski:** są niezaprzeczalne dane o wpływie PEM na organizm człowieka i zwierząt. W tabeli 7 są podane niektóre dane o wpływie uszeregowane według intensywności pola.

W/cm <sup>2</sup>	3 2	Katarakta oczu u psa po promieniowaniu w ciągu 10 min
	1	Katarakta oczu u psa po promieniowaniu w ciągu 3...5 godzin
mW/cm <sup>2</sup>	800 600 500 400	<b>Wrażenia bólowe przy promieniowaniu</b>
	300	Krótkotrwałe podwyższenie ciśnienia; po 20 ... 60 min. – wyraźny spadek (u kota, królika, psa)
	200	Ułomności potomstwa po promieniowaniu w ciągu 10 ...15 min. jajka kury ( $\lambda=12,6$ cm); Wymieranie kotów i królików (t=20 ... 60 min) Obniżenie regeneracyjnej (tlenkowo – odnawialnej) zdolności tkanki
	100 80 60 50	<b>Przy włączeniu obserwuje się podwyższenie ciśnienia a następnie szybkie zmniejszenie;</b> <b>Przy stałym promieniowaniu – stała hipotonia. Dwustronna katarakta.</b> Przyspieszenie, potem zwolnienie i zatrzymanie się serca u żaby
	40	Zmiany morfologiczne w płucach (rozrywanie naczyń włoskowatych i mnóstwo wylewów krwi, $\lambda = 3 \dots 10$ cm). Wzrost ciśnienia o 20 ... 30 mm sł. rtęci (promieniowanie w ciągu 0,5 ... 1 godz.)
	20	Podwyższenie regeneracyjnej (tlenkowo – odnawialnej) zdolności tkanki
	10 8 6	<b>Zmiany w odruchach warunkowych. Zmiany morfologiczne w korze mózgowej.</b> <b>Zmiany krzepliwości krwi.</b> <b>Zmiany w komórkach wątroby, <math>\lambda = 3 \dots 10</math> cm (oddziaływania chroniczne).</b> <b>Zmiany elektrokardiograficzne (oprócz decymetrowych).</b> <b>Zmiany aparatu receptorowego.</b>

5 4	Intensywność progowa, przy której obserwowane są zmiany w jądrach oraz zmiany ciśnienia (promieniowanie wielokrotne). Odwracalna leukopenia i erytopenia. Zmętnienie soczewki ocznej.
3 2	Wyraźne obniżenie ciśnienia tętniczego, bardziej przyspieszone tętno, wahania objętości krwi serca.
1 0.8 0.6 0.5 0.4 0.3	Obniżenie ciśnienia, tendencja do przyspieszania tętna, nieznaczne wahania objętości krwi serca. Dezadaptacja, zaburzenie mechanizmów sterowania odpornością. Zmniejszenie wydzielania soków żołądkowych u psa. Zauważalne zmiany układu nerwowego przy promieniowaniu w ciągu 5 ... 10 lat.
0.2	Nerwica u psów.
0.1 0.08 0.06 0.05 0.04 0.03	Zmiany elektrokardiograficzne ( dcm)    Tendencja do obniżenia ciśnienia przy oddziaływaniu chronicznym
0.02	Wyraźne podwyższenie temperatury skóry twarzy u osób, poddanych wcześniej promieniowaniu mikrofal