

## Człowiek w środowisku elektromagnetycznym

Kazimierz Orzechowski

Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii

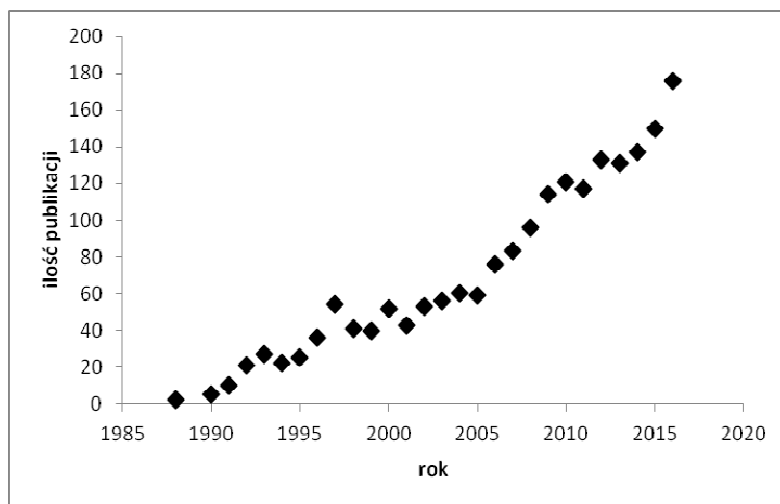
Zagadnienie określone w tytule jest nie tylko związane z moimi zainteresowaniami naukowymi, ale jest też niezwykle ważne społecznie. Pytanie o wpływ promieniowania elektromagnetycznego na zdrowie ludzi jest ostatnio często zadawane. Uprzedzając finał mojej wypowiedzi chciałbym Państwa uprzedzić, że niestety nie potrafię udzielić jednoznacznej odpowiedzi „za” lub „przeciw” szkodliwości promieniowania elektromagnetycznego, postaram się jednak w sposób obiektywny przedyskutować różne aspekty tej sprawy.

W naszych rozważaniach będziemy się „potykać” o obiegowe poglądy na temat szkodliwości promieniowania elektromagnetycznego na ludzi, postaram się jednak opierać głównie na koncepcjach potwierdzonych i przedstawionych w uznanych źródłach.

Zagadnienia dotyczące ekologii, ochrony środowiska naturalnego, utrzymania naszego pięknego świata w stanie niezmiennym są ostatnio bardzo „modne”, wiele się o nich mówi, wiele pisze. Pytania dotyczące wpływu promieniowania elektromagnetycznego mieszczą się w kręgu pytań o ekologię. Będę dyskutował wybrany fragment promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach nie przekraczających kilkudziesięciu gigaherców, to znaczy fale generowane przez telefonie komórkową, telewizję, radio, a również urządzenia elektryczne codziennego użytku. Jest to więc jedynie pewien wycinek promieniowania elektromagnetycznego oddziałującego na człowieka. Zasadniczym pytaniem jest, czy omawiane promieniowanie jest dla nas groźne, czy może ono w bliższej lub dalszej przyszłości wywołać niepożądane dla nas skutki? Argumenty „za” dosyć łatwo wskazać. Przede wszystkim bardzo szybko rośnie natężenie promieniowania elektromagnetycznego w naszym otoczeniu. Obecny poziom promieniowania znacznie przewyższa promieniowanie naturalne (związane z promieniowaniem kosmicznym i niektórymi zjawiskami naturalnymi). Kamieniami milowymi przyrostu promieniowania to odkrycie elektryczności, upowszechnienia radia, telewizji, telefonii komórkowej, łączności bezprzewodowej i satelitarnej. Obecność tego promieniowania można bez wątpienia nazwać „smogiem elektromagnetycznym” i traktować jako zanieczyszczenie naszego środowiska jest ono bowiem obce naszej przyrodzie. Argument „za” szkodliwością promieniowania sam cisnie się na usta: skoro w czasie ewolucji człowieka promieniowania tego nie było w naszym otoczeniu, to prawdopodobnie nie wykształciliśmy w sobie odpowiednich zabezpieczeń przed nim. Z drugiej jednak strony nie jest prawdą, że w trakcie ewolucji ludzie nie byli w ogóle poddawani wpływowi promieniowania elektromagnetycznego z tego zakresu częstotliwości. Jego źródłem jest przede wszystkim promieniowanie kosmiczne, ale też zjawiska atmosferyczne. Można przypuszczać, że bywały okresy w historii Ziemi kiedy promieniowane to było nawet całkiem spore. W tym kontekście trudno zrozumieć, że człowiek nie wykształcił w sobie żadnych sensorów ostrzegających przed tym promieniowaniem. Promieniowanie z innych zakresów częstotliwości jest przez nas bardzo precyzyjnie lokalizowane i odczuwane: promieniowanie podczerwone to uczucie ciepła, w zakresie widzialnym bardzo

dobrym „czujnikiem” są nasze oczy, trochę gorzej odczuwany promieniowanie ultrafioletowe, skutki jego są jednak szybko i dotkliwie odczuwalne (np. oparzenia słoneczne). Dlaczego więc nie posiadamy sensorów promieniowania mikrofalowego i radiowego? A może promieniowanie takie o umiarkowanym natężeniu nie jest dla nas szkodliwe? Jak widać z tej krótkiej dyskusji, którą prowadziłem ze sobą, można równie łatwo uzasadnić pogląd „za” jak i „przeciw”.

Bez wątplenia najwięcej obaw jest związanych z użyciem telefonów komórkowych. Powód jest oczywisty. Nadajnik trzymany bezpośrednio przy głowie powoduje, że natężenie promieniowania w obrębie naszej głowy może być znaczne. Wszyscy znamy z codziennego użytku kuchenki mikrofalowe, których wpływ na produkty żywnościowe jest ogólnie znany. Czy przypadkiem nasz mózg nie jest podobny do udek kurczaka podgrzewanych w kuchence mikrofalowej? Kuchenki mikrofalowe generują falę z zakresu mikrofalowego o częstotliwości ok. 2.2 GHz, zaś ich moc to zwykle 2-3 kW. Telefony komórkowe używają częstotliwości od 0.9-1.5 GHz, zaś współczynnik absorpcji swoistej SAR (Specific Absorption Rate) to ok. 1.5 W/kg. Uważa się, że tak mała moc promieniowania nie jest w stanie efektywnie podnieść temperatury obiektu na który działa (np. naszego mózgu), nie powinna więc być szkodliwa. Niestety wydają się temu przeczyć zdjęcia termowizyjne publikowane w Internecie, które porównują obraz termowizyjny głowy przed rozmową telefoniczną i po jej zakończeniu (np. <http://www.lifeharmonizer.name/index.php?id=901>). Testy termowizyjne mogą być jednak łatwo podważone, bowiem nawet sama treść rozmowy może wpływać na aktywność mózgu, nie mówiąc już o wpływie ciepłego telefonu docięniętego do ucha na rozkład temperatury ciała.



Rysunek 1. Ilość publikacji ukazująca się rocznie zawierająca w swoim tytule lub abstrakcie słowa kluczowe „electromagnetic field” i „health”. Zestawienie przygotowane w oparciu o Web of Science

Literatura dotycząca tej tematyki jest wyjątkowo bogata, co świadczy o zainteresowaniu, które wzbudza pytanie o szkodliwość promieniowania elektromagnetycznego. Poniższy wykres przedstawia ilość publikacji zawierającej w tytule lub abstrakcie słowa kluczowe „electromagnetic field” i „health” ukazujących się w kolejnych latach. Widzimy, że od lat 80-tych 20 w. zainteresowanie tą tematyką systematycznie wzrasta.

Aby nieco przybliżyć dyskusje toczące się w literaturze posłużę się tutaj publikacją, która ukazała się bardzo „dawno” jak na standardy obecnych badań, bo już w 1998 roku. Praca ta jest autorstwa M. H. Repacholiego i współpracowników, i powstała jako rezultat seminarium „Biological Effects of Non-Thermal Pulse and Amplitude Modulated RF Electromagnetic Fields and Related Health Hazards”, które odbyło się w 1996 roku [1], jest to jedna z częściej cytowanych prac dotyczących tej tematyki. Jej autorzy pracując na zlecenie Światowej Organizacji Zdrowia dokonali bardzo rzetelnego przeglądu doniesień literaturowych o wpływie promieniowania elektromagnetycznego małej mocy na zdrowie ludzi. W wyniku przeprowadzonych badań wyciągnięto wniosek, że nie ma przekonujących danych wskazujących na szkodliwość promieniowania niejonizującego, nie oznacza to jednak, że są całkowicie dla nas obojętne. Sugerowano, że szkodliwe jest promieniowanie RF i mikrofalowe w sytuacji, kiedy jest ono modulowane amplitudowo. Pośród różnych możliwych mechanizmów wpływu promieniowania na organizm wymieniono:

- wpływ na kanały jonowe w transporcie trans-membranowym i na pompy jonowe,
- możliwy wpływ promieniowania modulowanego amplitudowo lub przykładanego w postaci impulsów, natomiast brak zauważalnego wpływu cytotoksycznego „czystego” promieniowania RF,
- wpływ na membrany poprzez oddziaływanie z rodnikami,
- wpływ na podział komórek i transkrypcję widoczny dla wyższych dawek ( $SAR > 25$  W/kg),
- podejrzenia o wpływ na pracę mózgu, a zwłaszcza na barierę krew-mózg,
- możliwy wpływ na produkcję melatoniny (zaburzenia snu),
- stres wywołany tzw. „słyszeniem mikrofalowym”.

W badaniach epidemiologicznych nie stwierdzono jednoznacznego wpływu promieniowania na powstawanie nowotworów i na zaburzenia układu odpornościowego.

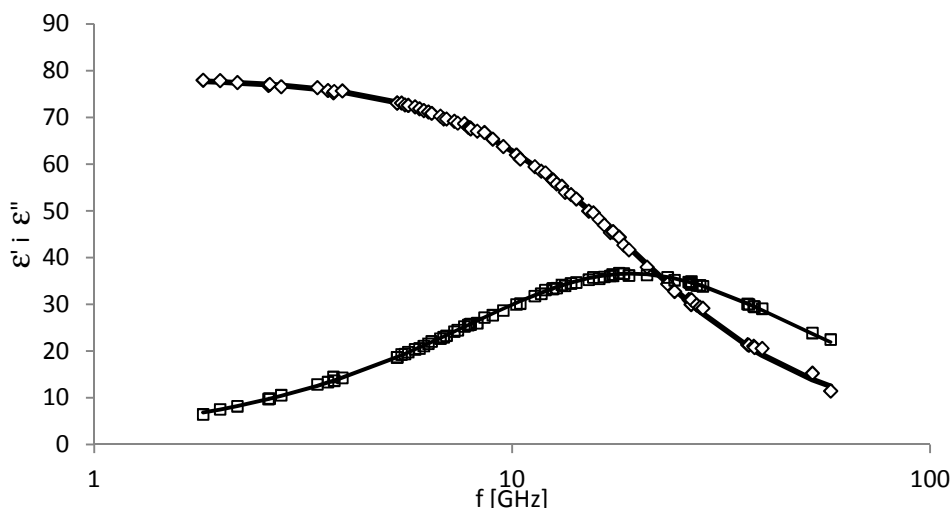
Do podobnych wniosków doprowadziły też prace innych badaczy. Na przykład testy przeprowadzone na ponad 5 tysiącach osób chorych na raka mózgu nie wykazały zauważalnej korelacji między zachorowaniem i użytkowaniem telefonów komórkowych [2]. Wieloletni program prowadzony w Japonii, na temat wpływu promieniowania o częstotliwościach radiowych i mikrofalowych na zdrowie ludzi [3] również nie wykazał aby było ono szkodliwe. W literaturze są jednak również informacje o niepożądanym wpływie promieniowania mikrofalowego na zmiany genetyczne [4], ale są i też takie, które udowadniają, że promieniowanie to może mieć korzystny wpływ na nasze zdrowie [5]. Jaka jest więc odpowiedź na pytanie o szkodliwość promieniowania radiowego i mikrofalowego na nasze zdrowie? Większość przytoczonych argumentów zdaje się uspokajać nas, że jest ono dla nas obojętne. Chciałbym jednak podkreślić, że jest to pogląd oparty jedynie na obecnie dostępnej wiedzy. Życie jest darem niezwykle pięk-

nym, ale i delikatnym. Nie jest wykluczone, że nawet tak mały wpływ, jaki wywiera promieniowanie naszych ulubionych telefonów komórkowych, bezprzewodowego przesyłania danych, wszystkich pól elektrycznych i magnetycznych otaczających nas we współczesnym środowisku jest dla nas szkodliwy. Badania na ten temat cały czas trwają i być może w najbliższej przyszłości dokonane zostaną fundamentalne odkrycia w tej dziedzinie. Rada jest więc taka, aby starać się zachować tzw. „zdrowy umiar”, ale i dystans do obiegowych sądów.

Niezależnie od tego czy promieniowanie elektromagnetyczne jest dla nas szkodliwe, czy nie, opracowywanie sposobów ochrony przed nim stanowi istotną gałąź współczesnych badań podstawowych i technologicznych. Ochrona może dotyczyć nie tylko naszego zdrowia, ale i informacji. Wszechobecna łączność bezprzewodowa, wykorzystanie telefonii komórkowej sprawiają, że ochrona informacji, które tak hojnie w przestrzeni rozrzucamy, jest jednym z ważniejszych wyzwań naszych czasów.

Od kilkunastu lat na Wydziale Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego prowadzone są prace nad stworzeniem nowych materiałów absorbujących promieniowanie elektromagnetyczne. Ich zastosowanie to głównie ochrona danych, ale też zastosowania wojskowe jako powłoki, które powodują, że obiekty są niewidoczne dla radarów. Duże osiągnięcia ma na tym polu zespół stworzony przez nieżyjącego już Prof. Huberta Kołodzieja [6]. Materiały zaprojektowane i zbudowane przez prof. Kołodzieja, dr Vogta, inż. Strzeleckiego i dr Sowę (PWr) należą do najefektywniejszych absorberów promieniowania z zakresu radiowego i mikrofalowego.

Chciałbym Państwu przedstawić niektóre badania, które prowadzę wraz z doktorantami. Dotyczą one prób opracowania absorberów promieniowania opartych na tanich mineralnych materiałach. Zanim jednak wyjaśnię szczegóły naszych prac, muszę odwołać się do kilku podstawowych pojęć z fizyki dielektryków.



Rysunek 2. Rzeczywista i urojona składowa przenikalności mierzona dla wody w funkcji częstotliwości. Temperatura pomiaru 25 °C. Maksimum urojonej składowej przenikalności jest zlokalizowane w pobliżu 20 GHz.

W badaniach dielektrycznych czynnikiem zaburzającym jest zmienne pole elektryczne, natomiast odpowiedzią ośrodka jest polaryzacja opisywana zespoloną przenikalnością elektryczną  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ , gdzie  $\varepsilon'$  to rzeczywista składowa przenikalności opisująca wektor polaryzacji,  $\varepsilon''$  – ujemna urojona składowa przenikalności opisująca rozpraszanie energii. Przenikalność elektryczna jest funkcją częstotliwości pola elektrycznego. Poniższy rysunek przedstawia rezultat pomiaru przenikalności elektrycznej w wodzie [7].

Podobny jakościowo przebieg obserwowany jest i w innych cieczach, w których cząsteczki obdarzone są trwałym momentem dipolowym. Dla niskich częstotliwości rzeczywista składowa przenikalności osiąga wartość statyczną, co oznacza, że wszystkie procesy molekularne nadążają za zmianami pola elektrycznego. Wraz ze wzrostem częstotliwości pola  $\varepsilon'$  spada. Ujemna urojona składowa przenikalności  $\varepsilon''$  osiąga maksimum w obszarze dyspersyjnym składowej rzeczywistej. Badania dielektryczne polegają na pomiarze przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości, natężenia pola elektrycznego, warunków zewnętrznych, składu. Na tej podstawie wyciągane są informacje na temat dynamiki molekularnej, oddziaływań międzycząsteczkowych i wewnętrznej struktury badanego materiału.

Fala elektromagnetyczna rozprzestrzeniająca się w kierunku „z” jest opisywana równaniem:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x = 0 \quad (1)$$

gdzie  $E_x$  to amplituda fali, natomiast  $\gamma$  nosi nazwę współczynnika propagacji. Współczynnik propagacji jest wielkością zespoloną daną wzorem:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}} \quad (2)$$

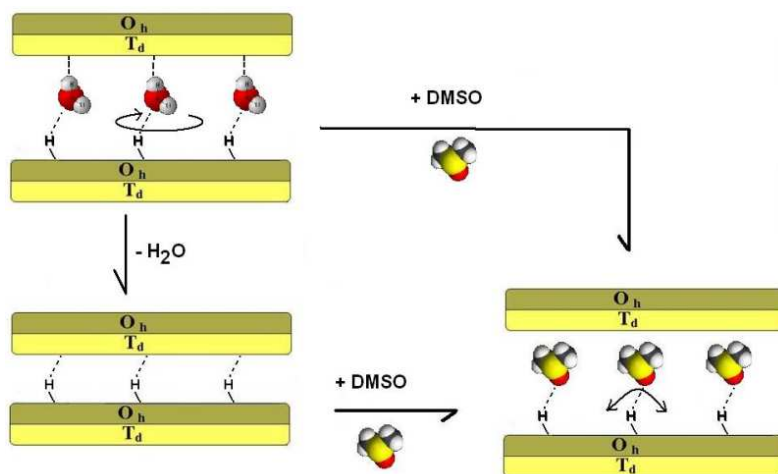
$\omega$  - to częstość kołowa,  $\varepsilon$  - bezwzględna przenikalność elektryczna,  $\mu$  - bezwzględna przenikalność magnetyczna materiału,  $\sigma$  – przewodnictwo właściwe,  $j^2 = -1$  jest jednostką urojoną. Z punktu widzenia zastosowań o których mówimy, ważna jest część rzeczywista współczynnika propagacji zwana też tłumiennością. Wydzielenie ze wzoru (2) części rzeczywistej prowadzi do następującej relacji określającej tłumienność ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \text{Re}\left(\frac{j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}}{c}\right) = \frac{\omega}{c\sqrt{2}}\sqrt{\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon' + \sqrt{(\mu'^2 + \mu''^2)(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)}}, \quad (3)$$

gdzie  $c$  - prędkość światła,  $\mu'$  i  $\mu''$  odpowiednio rzeczywista i urojona względna przenikalność magnetyczna. Zgodnie ze wzorem (3) właściwości tłumienne materiału zależą zarówno od parametrów elektrycznych jak i magnetycznych. Jest to zrozumiałe, ponieważ fala elektromagnetyczna to wzajemnie generujące się pola elek-

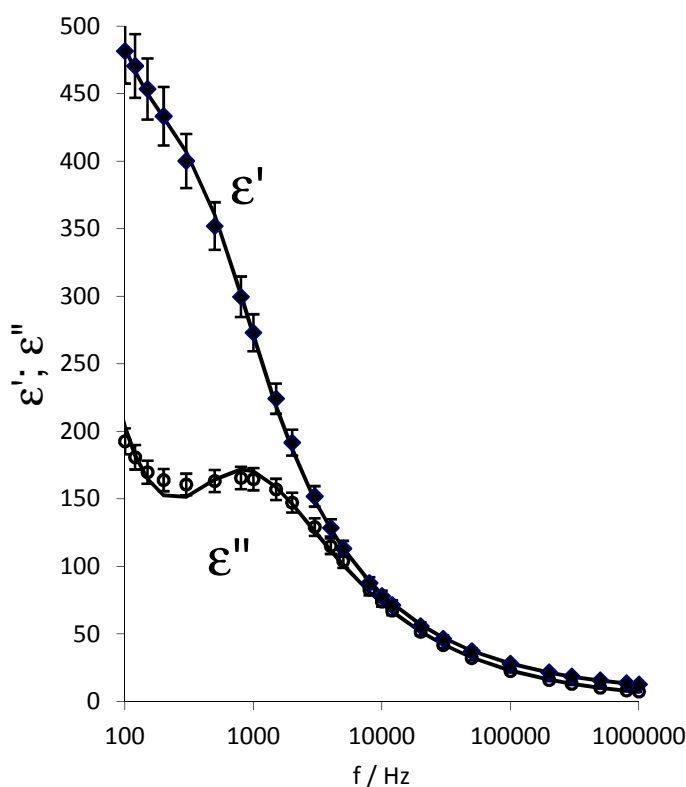
tryczne i magnetyczne i jedynie absorpcja obu składowych pozwala uzyskać dobry materiał dla ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym. Współczynnik tłumienia jest uwikłaną funkcją  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  i  $\mu''$ . Oszacowania prowadzi do wniosku, że materiał który ma absorbować promieniowanie w dużym zakresie częstotliwości powinien charakteryzować się zarówno dużą wartością przenikalności elektrycznej jak i magnetycznej.

W naszych badaniach zajęliśmy się minerałami ilastymi z grupy kaolinitu, a zwłaszcza kaolinitem i haloizytem. Bogate złoża tych minerałów są dostępne na Dolnym Śląsku. Minerale te są glinokrzemianami warstwowymi. Podstawową jednostką budulcową zarówno kaolinitu jak i haloizytu jest pakiet. Każdy pakiet składa się z dwóch warstw: warstwy silikatowej ( $\text{Si}_2\text{O}_5$ ) i gibbsytowej ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4$ ). Nawarstwiające się pakiety dają pełną strukturę minerału. Warstwa silikatowa składa się z tetraedrów (w centrum atom krzemu, w narożach – atomy tlenu), które łączą się narożami z trzema sąsiednimi tetraedrami w ten sposób, że ich środki ciężkości tworzą zdeformowane sześcioboki. Czwartym atomem tlenu warstwa silikatowa łączy się z warstwą oktaedryczną – tak więc obie warstwy są ze sobą związane poprzez wspólny atom tlenu. Pakiety są powiązane ze sobą wiązaniami wodorowymi. Niezwykłą właściwością minerałów warstwowych jest ich skłonność do tzw. „interkalacji”. Częsteczek prostych związków organicznych lub nieorganicznych mają zdolność do wchodzenia między pakiety minerału. Schemat takiego procesu jest przedstawiony na poniższym rysunku na którym cząsteczką nieskalującą jest dimetylosulfotlenek (DMSO). Wprowadzenie do przestrzeni międzypakietowej cząsteczek interkalanta zwiększa odległość między pakietami, powoduje też, że materiał staje się niezwykle plastyczny. Właściwość ta wykorzystana jest podczas produkcji porcelany.



Rysunek 3. Schemat procesu interkalacji. Proces może przebiegać poprzez podstawienie cząsteczek wody międzypakietowej cząsteczkami interkalanta, możliwe jest też wcześniejsze usunięcie wody międzypakietowej, a następnie wprowadzenie cząsteczek związku interkalującego.

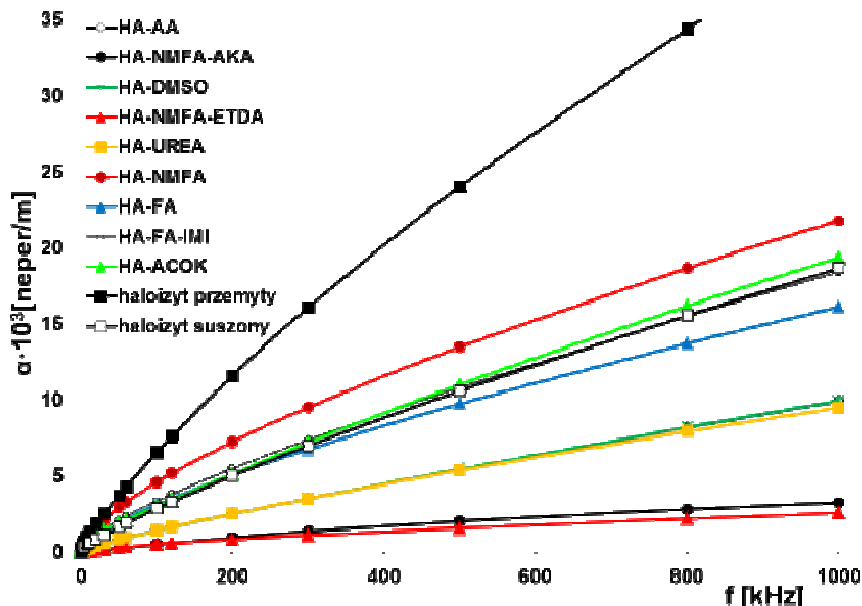
Zgodnie ze wzorem (3) wzrost rzeczywistej i urojonej składowej przenikalności będzie korzystnie wpływał na właściwości tłumienne materiału. Rzeczywista składowa przenikalności elektrycznej jest uzależniona od możliwości polaryzacji materiału w zewnętrznym polu elektrycznym. Polaryzacja może być związana z ruchami cząsteczek posiadających moment dipolowy, warunkiem jest jednak pewna swoboda ich ruchu. Interkalacja kaolinitu i haloizytu cząsteczkami dipolowymi miała na celu wprowadzenie do przestrzeni międzypakietowych cząsteczek polarnych zdolnych do ruchów w zewnętrznym polu elektrycznym. W naszych badaniach przetestowaliśmy dużą grupę różnorodnych interkalantów, poszukując takich, które podwyższą w sposób istotny zarówno rzeczywistą jak i urojoną składową przenikalności elektrycznej. Rezultaty przykładowych badań przeprowadzonych w haloizycie interkalowanym przy pomocy formamidu [8] przedstawia rysunek 4.



Rysunek 4. Rezultaty badania relaksacji dielektrycznej w haloizycie interkalowanym przy pomocy formamidu [8].

Stosunkowo duża wartość przenikalności  $\epsilon'$  dla niskich częstotliwości i maksimum  $\epsilon''$  dla częstotliwości ok. 1 kHz pozwalają przypuszczać, że materiał ten będzie dobrym absorberem promieniowania dla niskich częstotliwości. W kontekście rozważanych wcześniej zagrożeń związanych promieniowaniem elektromagnetycznym

absorpcja niskoczęstotliwościowego fragmentu widma jest bardzo pożądaną właściwością. Wartość współczynnika tłumienia dla różnych badanych przez nas materiałów przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5. Współczynnik tłumienia w funkcji częstotliwości dla różnych materiałów opartych na haloizycie.

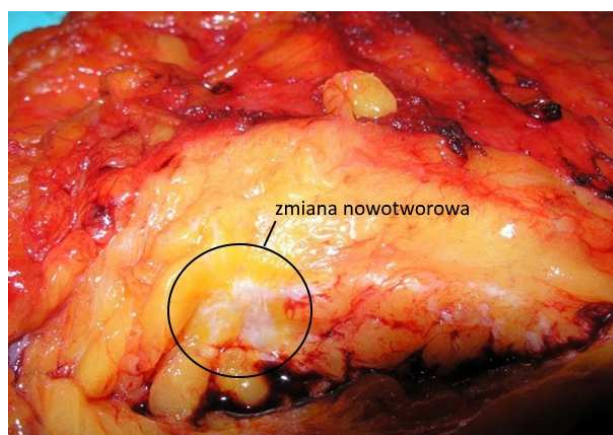
Badania nad materiałami absorbującymi promieniowanie opartymi na modyfikowanych minerałach ilastych nadal trwają. Obecnie pracujemy nad poprawieniem stabilności termicznej interkalatów jak również poszerzeniem zakresu absorpcji dielektrycznej. Dużym utrudnieniem w ewentualnych zastosowaniach jest to, że materiały tracą powoli interkalowane cząsteczki, a tym samym pogarszają swoje właściwości jako absorbery.

W pierwszej części mojej wypowiedzi starałem się zastanowić nad zagrożeniami zdrowia związanymi z promieniowaniem elektromagnetycznym, w drugiej części przedstawiłem jak można chronić się przed promieniowaniem poprzez zastosowanie odpowiednich powłok tłumiących. Obecnie chciałbym przedstawić Państwu niektóre korzyści, które mogą wynikać z zastosowania promieniowania elektromagnetycznego.

Od kilku lat na Wydziale Chemii Uniwersytetu Wrocławskiego prowadzone są prace nad nowym urządzeniem, opartym na wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego, a wykorzystywanym do śródoperacyjnego wykrywania zmian nowotworowych, zwłaszcza nowotworów piersi. Metoda jest dedykowana do oceny tzw. czystości marginesów chirurgicznych, a również do wykrywania dodatkowych ognisk zmian nowotworowych w sąsiedztwie wycinanego guza.



Nowotwory piersi są jednym z najczęstszych nowotworów u kobiet, są też najczęstszą przyczyną śmierci z powodu nowotworu. W Polsce co roku zapada na tą chorobę ok. 18000 kobiet. Zasadniczym sposobem leczenia jest zabieg operacyjny podlegający na usunięciu całej piersi wraz z węzłami chłonnymi (mastektomia) lub jedynie fragmentu objętego zmianami nowotworowymi (zabieg oszczędzający - lumpektomia). Około 50% zabiegów jest wykonywanych jako oszczędzające. Powodzenie zabiegu oszczędzającego jest uzależnione od możliwości doszczętnego usunięcia guza nowotworowego wraz z marginesem tkanki zdrowej. Poniższe zdjęcie pokazuje przykład tkanki piersi zawierającej guz nowotworowy.

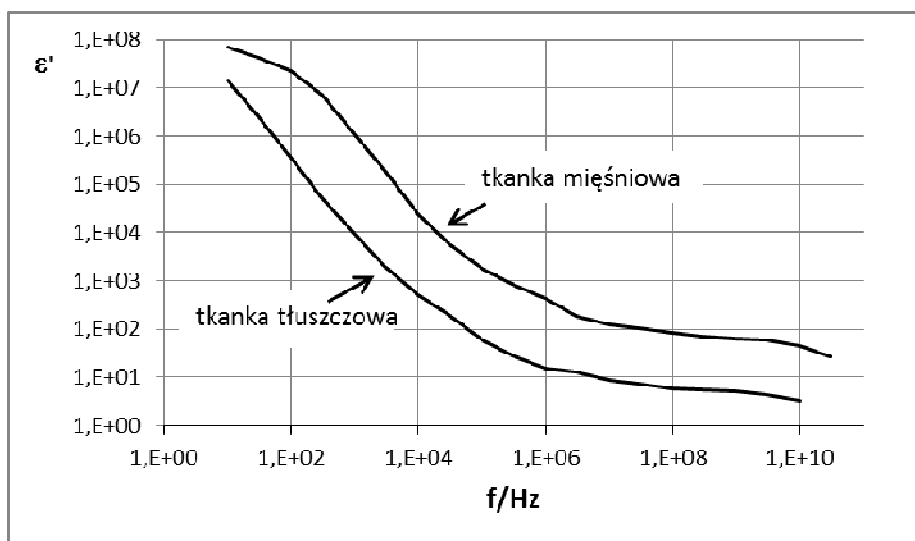


Rysunek 6. Widok tkanki piersi po zabiegu mastektomii z zaznaczonym obszarem zmian nowotworowych.

Jak widzimy na przedstawionym zdjęciu, określenie zasięgu zmian nowotworowych nie jest łatwe. Wymaga ono od chirurga dużego doświadczenia, a czasem i szczęścia, aby poprawnie usunąć guz. Po zakończeniu operacji wycinek jest przesyłany do histologa, który wykonuje badania mikroskopowe powierzchni wyciętej tkanki i kontroluje, czy w tzw. marginesach cięcia nie pozostały zmiany nowotworowe. Jeśli zmiany takie będą obecne wówczas operacja musi być powtórzona, zwykle w bardziej radykalnym zakresie. Statystyki pokazują, że prawie 25% operacji jest powtarzanych z powodu obecności zmian nowotworowych w marginesach cięcia.

Istnieją śródoperacyjne techniki pozwalające kontrolować czystość marginesów. Wymienić tu można cytologię dociskową, fluorescencję lub śródoperacyjne badania USG. Stosunkowo nową metodą są badania właściwości elektrycznych tkanek, wykonywane w zakresie RF i mikrofalowym. Do tej grupy metod należy technika opracowana na Wydziale Chemii UW.

W zaproponowanej metodzie śródoperacyjnej lokalizacji tkanek nowotworowych wykorzystano różnice obserwowane między tkankami zdrowymi i chorymi piersi. Rysunek 7 przedstawia przebieg rzeczywistej składowej przenikalności elektrycznej mierzonej w tkance tłuszczowej i w mięśniu. Zdrowa tkanka piersi przypomina tkankę tłuszczową, zaś tkanka ze zmianami nowotworowymi tkankę mięśniową.

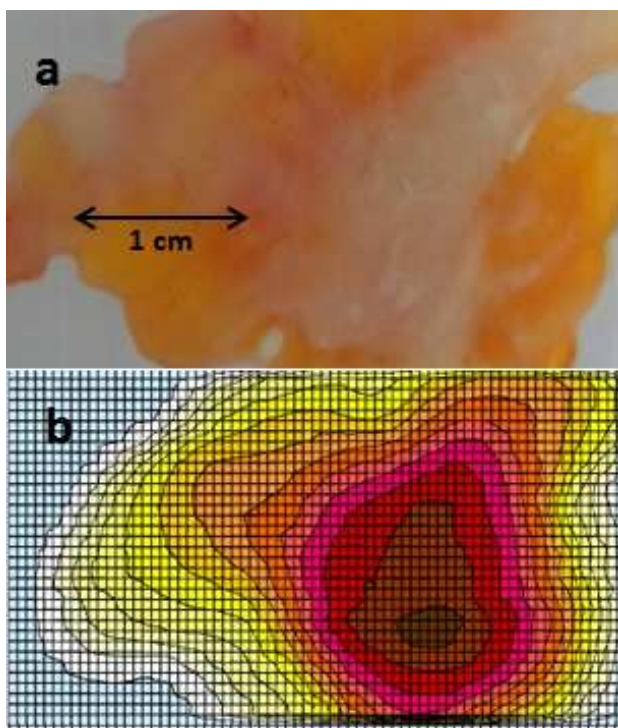


Rysunek 7. Porównanie przenikalności elektrycznej tkanki tłuszczowej i tkanki mięśniowej mierzonych w funkcji częstotliwości. Dane zaczerpnięte z pracy [9].

Jak widzimy przenikalność elektryczna tkanek osiąga bardzo duże wartości w stosunku do tej obserwowanej np. w wodzie. Powodem dużych wartości  $\epsilon'$  w tkankach obserwowanych dla niskich częstotliwości ( $f < 1\text{MHz}$ ) są mechanizmy polaryzacji związane głównie z migracją jonów w obszarach ograniczonych przestrzennie, takich jak komórki i błony komórkowe. Można je formalnie opisać tzw. zjawiskiem Maxwella-Wagnera. Dla częstotliwości wyższych za właściwości dielektryczne odpowiadają ruchy dużych cząsteczek o znacznych momentach dipolowych, ale też relaksacja dielektryczna wody wolnej i wody związanej. Literatura dotycząca interpretacji przenikalności elektrycznej tkanek jest bardzo bogata i osoby zainteresowane tym zagadnieniem odsyłam do fachowych czasopism [10]–[12].

Rysunek 7 pokazuje, że w całym prezentowanym przedziale częstotliwości parametry elektryczne tkanki mięśniowej (nowotworowej) są znacznie wyższe niż tkanki tłuszczowej (zdrowej tkanki piersi). Skala przenikalności na wykresie jest skalą logarymiczną, co oznacza, że różnice między obydwoma rodzajami tkanek są naprawdę duże i wynoszą około jeden rząd wartości. Na tej właściwości oparta jest zaproponowana metoda odróżniania tkanek nowotworowych od zdrowych gruczołu piersiowego. Skonstruowano przyrząd pozwalający badać w czasie operacji właściwości elektryczne wyciętych tkanek i na tej podstawie wyciągać wnioski na temat obecności lub braku tkanek nowotworowych w marginesach cięcia. Przyrząd ten został skonstruowany i opatentowany w Polsce. Jego celem jest dostarczenie chirurgowi dodatkowej informacji pozwalającej podjąć decyzję o poszerzeniu operacji już w trakcie jej trwania. W setkach testów przeprowadzonych do tej pory pokazaliśmy, że czułość i specyficzność metody są bardzo duże i stawiają ją wśród najlepszych technik wspomagających ocenę czystości marginesów chirurgicznych. Poniższy rysunek przedstawia porównanie zdjęcia tkanki zawierającej obszar zmian nowo-

tworowych i wynik skanowania parametrów dielektrycznych na powierzchni tkanki. Widzimy bardzo duże podobieństwo między obrazem dielektrycznym i morfologią tkanki. Dodatkową zaletą metody jest to, że „widzi” ona zmiany nowotworowe również pod warstwą tłuszczu, a tym samym pozwala chirurgowi na zlokalizowanie dodatkowych ognisk nowotworowych w polu operacyjnym. Skonstruowana przez nas sonda nie jest jeszcze używana w czasie rutynowych zabiegów. Obecnie wykorzystywanych jest tylko kilka prototypów i cały czas trwają starania zmierzające do upowszechnienia tej techniki. Sonda testowana jest również w zabiegach onkologicznych prowadzonych na zwierzętach. Okazuje się, że może być ona z powodzeniem zastosowana podczas lokalizacji guzów nowotworowych u kotów.



Rysunek 8. Porównanie zdjęcia (a) tkanki zawierającej zmiany nowotworowe z „mapą dielektryczną” (b) wykonaną przy pomocy sondy.

Jak widzimy na rysunku 8, rezultat pomiarów dielektrycznych bardzo precyzyjnie odtwarza lokalizację zmian nowotworowych. Trzeba jednak podkreślić, że nie jest to metoda zastępująca histologię. Wynik pomiaru jest związany z morfologią tkanki, a nie ze zmianami nowotworowymi w poszczególnych komórkach. Z tego względu sonda jest jedynie dodatkowym „okiem” chirurga pozwalającym podjąć właściwą decyzję podczas operacji. Mamy nadzieję, że upowszechnienie wrocławskiego wynalazku przyczyni się do poprawy skuteczności leczenia nowotworów piersi, mniejszej ilości reoperacji, a tym samym zmniejszy cierpienia pacjentów.

Szanowni Państwo, zbliżam się do końca mojej wypowiedzi na temat wpływu promieniowania elektromagnetycznego na człowieka. Zdaję sobie sprawę, że temat nie jest wyczerpany, ani zamknięty. Staralem się możliwie obiektywnie przedstawić zagrożenia związane z niejonizującym promieniowaniem elektromagnetycznym, ale również wskazać sposoby ochrony przed nim, a również korzyści z jego wykorzystania. Jeśli miałbym zakończyć radą, to proponuje zachować umiar w korzystaniu z nowych osiągnięć techniki, z drugiej jednak strony są one dla nas też szansą, z której nieskorzystanie byłoby błędem.

### Cytowana literatura

- [1] M. H. Repacholi, "Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs," *Bioelectromagnetics*, vol. 19, no. 1, pp. 1–19, 1998.
- [2] The INTERPHONE Study Group, "Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study," *Int. J. Epidemiol.*, vol. 39, no. 3, pp. 675–694, Jun. 2010.
- [3] M. Taki, "Bioelectromagnetics researches in Japan for human protection from electromagnetic field exposures: BIOELECTROMAGNETICS RESEARCHES IN JAPAN," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 683–695, Nov. 2016.
- [4] S. Banik, S. Bandyopadhyay, and S. Ganguly, "Bioeffects of microwave—a brief review," *Bioresour. Technol.*, vol. 87, no. 2, pp. 155–159, 2003.
- [5] D. I. de Pomerai *et al.*, "Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating," *FEBS Lett.*, vol. 543, no. 1–3, pp. 93–97, May 2003.
- [6] A. Vogt, H.A. Kołodziej, S. Strzelecki, A.Sowa, Electromagnetic energy absorbing materials, UK Pat. Reg. / GB 2 379 331 A / 2003.
- [7] U. Kaatze, "Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, 1989.
- [8] M. Adamczyk, M. Rok, A. Wolny, and K. Orzechowski, "Dielectric properties of halloysite and halloysite-formamide intercalate," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 2, p. 24101, Jan. 2014.
- [9] C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, p. 2231, 1996.
- [10] K. FOSTER and H. SCHWAN, "DIELECTRIC-PROPERTIES OF TISSUES AND BIOLOGICAL-MATERIALS - A CRITICAL-REVIEW," *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 25–104, 1989.
- [11] A. SUROWIEC, S. STUCHLY, J. BARR, and A. SWARUP, "DIELECTRIC-PROPERTIES OF BREAST-CARCINOMA AND THE SURROUNDING TISSUES," *Ieee Trans. Biomed. Eng.*, vol. 35, no. 4, pp. 257–263, Apr. 1988.
- [12] M. Lazebnik *et al.*, "A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal breast tissue obtained from reduction surgeries," *Phys. Med. Biol.*, vol. 52, no. 10, pp. 2637–2656, May 2007.