



Publikacja wyraża jedynie poglądy autora/ów i nie może być utożsamiana z oficjalnym stanowiskiem Ministerstwa Cyfryzacji.

Fale radiowe w medycynie i dietetyce: zastosowanie niejonizującego pola elektromagnetycznego w diagnostyce i terapii układu pokarmowego

dr hab. Grzegorz Tatoń, prof. UJ

Zakład Biofizyki, Katedra Fizjologii, Wydział Lekarski, Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego

1. Wstęp

Fale radiowe, stanowiące część widma fal elektromagnetycznych, są obok podczerwieni i światła widzialnego tym podzakresem, który nie powoduje jonizacji podczas oddziaływania z materią. Najczęściej kojarzone są z elektrotechniką, a w szczególności technologiami komunikacyjnymi: radiem, telefonią komórkową czy sieciami bezprzewodowymi.

W potocznym wyobrażeniu są one zjawiskiem mało zrozumiałym i niemal abstrakcyjnym – czymś niewidzialnym, czymś co „unosi się w powietrzu” i służy przesyłaniu informacji. Z perspektywy fizyki medycznej, biofizyki czy diagnostyki medycznej obraz ten jest jednak niepełny. Fale radiowe, pomimo tego że nie wywołują jonizacji, to oddziałują z materią, w tym materią ożywioną, a przy okazji stanowią jeden z najlepiej poznanych i powszechnie wykorzystywanych w zastosowaniach medycznych fragmentów widma pola elektromagnetycznego (PEM). Oddziaływanie fal radiowych z organizmem człowieka od dekad jest przedmiotem systematycznych badań naukowych i stanowi podstawę ich zastosowania w szeroko rozumianej diagnostyce i terapii [1], [2], [3], [4].

Zastosowanie fal radiowych w telekomunikacji zdominowało ich postrzeganie w kontekście praktycznego wykorzystania, ale aplikacje medyczne nie są już tak oczywiste. Przypuszczalnie nawet osoby niezwiązane ze światem medycyny nie byłyby w stanie wskazać ich konkretnych medycznych zastosowań. Zwłaszcza w takich dziedzinach jak dietetyka, czy diagnostyka i terapia układu pokarmowego. Niniejsze opracowanie koncentruje się na tych właśnie konkretnych zastosowaniach, więc wydaje się celowe ich zdefiniowanie, pomimo tego że pojęcia te mogą nie wydawać się obce ze względu na ich dość powszechne stosowanie.

Według encyklopedii PWN „dietetyka”, to nauka obejmująca ogół wiedzy związanej z racjonalnym żywieniem człowieka oraz działalność w tym zakresie [5]. Powyższa definicja

nie jest specjalnie użyteczna w celu identyfikacji potencjalnych zastosowań fal radiowych w tej dziedzinie, a dopiero nieco bardziej szczegółowy opis obszarów zainteresowania dietetyki zawarty w Wikipedii pozwala je dostrzec. Według Wikipedii jest to nauka medyczna o żywieniu człowieka zajmująca się: zasadami żywienia człowieka zdrowego i chorego, oceną stanu odżywienia, oceną wzajemnego wpływu farmakoterapii i żywienia, zapobieganiem chorobom zależnym od żywienia, kontrolowaniem jakości produktów żywnościowych i warunków ich przechowywania, biochemicznymi podstawami żywienia, prowadzeniem edukacji żywieniowej, psychologią żywienia i technologiami gastronomicznymi [6]. Oczywiście ocena stanu odżywienia jest tym obszarem z bogatego zakresu zainteresowań dietetyki, w którym zastosowanie fal radiowych wydaje się najprostsze i najbardziej oczywiste. Czymś, czego nie da się tak łatwo wysnuć nawet na podstawie tej ostatniej definicji, jest możliwość oceny związków pomiędzy fizycznymi czynnikami środowiskowymi i odżywianiem oraz możliwość prowadzenia badań naukowych związanych z odżywianiem człowieka, np. poprzez ocenę wpływu na organizm konkretnych ingerencji dietetycznych. Można wyobrazić sobie również możliwość poprawy stanu odżywienia organizmu poprzez stosowanie metod z zakresu fizykoterapii z użyciem fal radiowych z równoczesnym stosowaniem zaleceń dietetycznych.

Kolejnym pojęciem, które należy zdefiniować na początku, jest „układ pokarmowy”. W powszechnym rozumieniu układ pokarmowy utożsamiany jest raczej z „przewodem pokarmowym”, ale takie rozumienie jest nie do końca poprawne. Otóż sam „przewód pokarmowy” jest częścią „układu pokarmowego”, a ten ostatni rozumiany jest jednak szerzej. Znowu posłużymy się Encyklopedią PWN [7]: układ pokarmowy (układ trawienny) – zespół narządów biorących udział w pobieraniu, trawieniu i wchłanianiu pokarmu oraz wydalaniu niestrawnych resztek i produktów przemiany materii. Układ pokarmowy w uproszczeniu ma postać umięśnionej rury o zróżnicowanej średnicy, długości i budowie ścian, zawierających zwykle śródścienne gruczoły trawienne, z którą łączą się pozaścienne gruczoły trawienne. W tym szerszym rozumieniu najważniejszą i największą częścią układu pokarmowego jest rzeczywiście przewód pokarmowy (składający się m.in. z ust, przełyku, żołądka i jelit), ale w jego skład wchodzi również m.in. ślinianki, trzustka i wątroba.

W celu szczegółowego wyjaśnienia tytułu opracowania należy jeszcze podjąć podstawową kwestię związaną z dyskusją o wpływie fal elektromagnetycznych, jaką jest rozróżnienie między promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Fale elektromagnetyczne równie dobrze można nazywać polem elektromagnetycznym, a ponieważ mają one zdolność do przekazywania energii materii, z którą oddziałują, to często również – promieniowaniem elektromagnetycznym (coś „promieniuje” czyli wysyła energię, a coś innego jest „napromieniowane” czyli pochłania energię). W tym momencie należy nawiązać również do teorii dualizmu korpuskularnego, która mówi, że fale elektromagnetyczne w niektórych sytuacjach zachowują się jak strumienie cząsteczek o zerowej masie zwanych fotonami. I nie jest to czysta teoria, tak jest bowiem w istocie: fala elektromagnetyczna i strumień fotonów są tym samym. Właściwości typowo falowe, czyli długość i częstotliwość fali mają oczywiście

powiązanie z własnościami cząsteczkowymi, czyli energią fotonów i ich pędem. Intuicyjnie łatwo można dojść do dość prostego i prawdziwego wniosku, że jeśli foton i fala to to samo, więc energia fotonu będzie tym większa im szybciej drga pole, czyli tym większa im większa będzie częstotliwość fali.

Obserwacja taka jest ważna w kontekście zjawiska, jakim jest jonizacja. Jest to proces, w którym podstawowe elementy materii, takie jak atomy i cząsteczki są rozbijane na elementy składowe, czyli jony i elektrony. Układy takie jak cząsteczki i atomy w normalnych warunkach są stabilne i aby je rozbić należy użyć energii dostarczonej z zewnątrz. W celu zjonizowania układu trzeba użyć jednorazowo, w jednym akcie oddziaływania, wystarczająco dużej energii, która przewyższy energię wiązania danego układu. Innymi słowy z cząsteczką lub atomem musi oddziaływać foton niosący odpowiednio dużą energię, albo inaczej – fala elektromagnetyczna o odpowiednio wysokiej częstotliwości.

Fotony promieniowania jonizującego, takiego jak promieniowanie ultrafioletowe, rentgenowskie czy gamma, posiadają energię wystarczającą do wywoływania jonizacji atomów i cząsteczek. Jonizacja z kolei może prowadzić do pewnych reakcji chemicznych albo biochemicznych, jeśli mają one miejsce w organizmach żywych. To z kolei wiąże się z ryzykiem uszkodzeń biologicznych i z konkretnymi problemami zdrowotnymi dla organizmu. Podkreślmy to zdecydowanie, że fale radiowe należą do zakresu promieniowania niejonizującego – energia pojedynczego fotonu jest w ich przypadku zbyt mała (setki tysięcy, albo miliony razy), by bezpośrednio zmieniać strukturę chemiczną cząsteczek biologicznych [1], [2], [3], [4]. Ta fundamentalna cecha sprawia, że fale radiowe mogą być bezpiecznie stosowane w medycynie, o ile zachowane są odpowiednie parametry ekspozycji. Zasada ta nie dotyczy promieniowania jonizującego, które zawsze jest niebezpieczne i należy go unikać o ile to tylko możliwe, a jego medyczne zastosowania są dopuszczalne wtedy, gdy korzyść diagnostyczna, czy terapeutyczna jest większa niż ryzyko zdrowotne. Zwróćmy przy tym uwagę na to, że w przypadku fali radiowej muszą jednak być zachowane odpowiednie parametry ekspozycji, a wynika to z faktu, że fale radiowe oddziałują na organizm na drodze innych procesów niż jonizacja. Gdyby nie oddziaływały w ogóle, to nie byłaby przecież możliwa ani diagnostyka, ani terapia z ich zastosowaniem.

Układ pokarmowy jest szczególnie interesującym obiektem badań z punktu widzenia zastosowania niejonizującego PEM, którego oddziaływanie zależy m.in. od własności elektrycznych i dielektrycznych tkanek. Jest to środowisko fizyczne bogate w płyny zawierające wodę i jony oraz charakteryzujące się dużą dynamiką zmian. Zawartość przewodności pokarmowej, stopień nawodnienia, aktywność perystaltyczna oraz lokalne zmiany ukrwienia związane z procesem trawienia powodują, że właściwości elektryczne i dielektryczne tego układu ulegają ciągłym zmianom. Oznacza to, że układ pokarmowy człowieka nie jest jednorodnym ośrodkiem elektromagnetycznym, lecz układem niejednorodnym i dynamicznym, którego reakcje na fale radiowe są zmienne, ale mierzalne

i możliwe do modelowania. To z kolei pozwala na wyciąganie wniosków o stanie układu pokarmowego na podstawie badania jego interakcji z falami radiowymi [8], [9], [10].

Z punktu widzenia fizyki oddziaływanie fal radiowych z tkankami biologicznymi ma charakter dobrze opisany i przewidywalny. Nieważne czy mowa o falach radiowych stosowanych w znanych i zaakceptowanych od dawna technologiach jak radio i telewizja, czy o nowoczesnych technologiach, takich jak systemy telekomunikacyjne piątej generacji (5G). Dominującym i najlepiej udokumentowanym mechanizmem interakcji fal radiowych z organizmem pozostaje efekt termiczny, wynikający z absorpcji energii fali elektromagnetycznej przez tkanki o określonych właściwościach dielektrycznych [1], [2], [4]. Efekt ten prowadzi do niewielkiego wzrostu temperatury, który w warunkach klinicznych jest ściśle monitorowany i regulowany. W przypadku interakcji organizmu w środowisku z polem o niewielkiej intensywności mechanizmy termoregulacji, w jakie jest on wyposażony, powodują natychmiastowe niwelowanie lokalnych wzrostów temperatury. Doniesienia o specyficznych, nietermicznych efektach biologicznych, takich jak rzekome „rezonanse częstotliwościowe” czy unikalne właściwości wybranych pasm fal radiowych, nie znajdują spójnego i powtarzalnego potwierdzenia eksperymentalnego w literaturze naukowej [1], [2], [3].

Skoro tak istotne jest zachowanie odpowiednich parametrów ekspozycji, aby korzystanie z fal radiowych było całkowicie bezpieczne, to w kontekście zdrowia publicznego i praktyki klinicznej istotną rolę odgrywają międzynarodowe regulacje dotyczące ekspozycji na PEM. Organizacje takie jak Światowa Organizacja Zdrowia (World Health Organization – WHO) oraz Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP) opracowały wytyczne, które uwzględniają szerokie marginesy bezpieczeństwa i opierają się na aktualnym stanie wiedzy naukowej [3], [11]. Regulacje te stanowią fundament bezpiecznego stosowania technologii opartych na falach radiowych w praktycznych rozwiązaniach oraz w medycynie i stanowią podstawy do uregulowań prawnych mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa społeczeństwa podczas stosowania tego rodzaju technologii.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie zastosowań fal radiowych w diagnostyce i terapii układu pokarmowego oraz omówienie ich znaczenia dla współczesnej dietetyki. Artykuł koncentruje się na technikach opartych na niejonizującym PEM z zakresu fal radiowych – zarówno tych klinicznie ugruntowanych, takich jak tomografia rezonansu magnetycznego, jak i metod nadal rozwijanych, obejmujących diagnostykę opartą na właściwościach dielektrycznych tkanek czy systemy monitorowania oparte na transmisji radiowej.

2. Podstawy fizyczne

Zrozumienie sposobu w jaki fale radiowe mogą być wykorzystywane w diagnostyce i terapii medycznej wymaga wprowadzenia kilku podstawowych pojęć fizycznych. Precyzyjny opis zagadnień związanych z oddziaływaniami elektromagnetycznymi jest trudny i silnie sformalizowany matematycznie, a u jego podstaw leżą równania Maxwella. Na szczęście

kluczowe zasady można wyjaśnić w sposób intuicyjny, bez odwoływania się do skomplikowanego aparatu matematycznego. Takie podejście pozwala zachować poprawność naukową, a jednocześnie uniknąć nadmiernych uproszczeń prowadzących do błędnych interpretacji.

Jak wiemy ze szkoły, ładunki elektryczne oddziałują na siebie pewnymi siłami. Jednoimienne, czyli o tym samym znaku, odpychają się, a różnoimienne – przyciągają się. Skoro na ładunek w pobliżu innego ładunku działa siła, to znaczy, że w jego otoczeniu istnieje „coś”, co tą siłą generuje: wokół ładunku elektrycznego rozciąga się pole elektryczne. I tak należy to pojęcie rozumieć, ponieważ pole elektryczne, to obszar przestrzeni, w którym na ładunki elektryczne działają siły. Przy czym nie ma znaczenia, czy ładunki te się poruszają, czy pozostają początkowo w spoczynku. Jeśli się poruszają, to pole elektryczne wpłynie na ten ruch (zmieni trajektorię, przyspieszy lub zwolni ładunek). Jeśli się nie poruszają, to pole elektryczne wprawi je w ruch. Źródłem pola elektrycznego jest ładunek elektryczny albo rozkład ładunków. Poruszający się ładunek elektryczny jest źródłem pola elektrycznego, które z punktu widzenia konkretnego, stałego punktu w przestrzeni jest zmienne. Uporządkowany ruch ładunków elektrycznych nazywamy prądem elektrycznym [12]. Pole magnetyczne nieco trudniej zrozumieć – jest to obszar przestrzeni, w którym na ładunki elektryczne również działają siły, ale tylko na te, które się poruszają. Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne albo zmienne pole elektryczne. Źródłem zmiennego pola elektrycznego może być zmienne pole magnetyczne. Zauważmy więc, że zmienne pole jednego rodzaju (elektryczne lub magnetyczne) generuje zmienne pole drugiego rodzaju (magnetyczne lub elektryczne).

Fala elektromagnetyczna jest rozchodzącym się w przestrzeni sprzężeniem zmiennego pola elektrycznego i magnetycznego. Jednym z podstawowych parametrów opisujących to zjawisko jest częstotliwość, która określa liczbę oscylacji pola w jednostce czasu. To właśnie częstotliwość, a nie sama obecność pola elektromagnetycznego, w największym stopniu determinuje sposób oddziaływania fali elektromagnetycznej z materią. Fale radiowe zajmują niskoczęstotliwościową część widma elektromagnetycznego, co bezpośrednio przekłada się na niską energię pojedynczych fotonów, które są z nimi związane [1], [2], [12]. W zależności od źródła literaturowego możemy spotkać się z nieco odmiennymi definicjami zakresu częstotliwości, które przypisuje się falom radiowym i poszczególnym ich podzakresom, czyli np. mikrofalom. Możemy przyjąć, że mikrofały, to fale elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu od 300 MHz do 300 GHz (czyli długościach w zakresie od 1 m do 1 mm) i stanowią one podzakres fal radiowych, których częstotliwości rozciągają się od 3 Hz (długość fali rzędu 100 km) do 300 GHz [12].

Z punktu widzenia biologii i medycyny kluczowe znaczenie ma fakt, że energia fotonów fal radiowych jest zbyt mała, by powodować jonizację atomów lub cząsteczek. Dla mikrofal zakres energii fotonów rozciąga się od około 1,2 μeV do około 1,2 meV. Dolna granica energii dla fotonów fal radiowych jest znacznie niższa i wynosi około 1,2 peV. Elektronowolt (1 eV)

z kolei, to jednostka energii stosowana w opisie mikroświata i określa z naszego makroskopowego punktu widzenia niewyobrażalnie wprost małą paczkę energii. Aby mogło dojść do jednokrotnej jonizacji cząsteczki wody musimy jej dostarczyć około 5 eV energii.

Powyższe informacje jednoznacznie pokazują, że fale radiowe nie są zdolne do bezpośredniego uszkodzenia wiązań chemicznych w strukturach biologicznych, w przeciwieństwie do promieniowania jonizującego. Ta fundamentalna różnica stanowi fizyczną podstawę rozróżnienia między technikami obrazowania, diagnostyki i terapii opartymi na promieniowaniu jonizującym, a metodami wykorzystującymi niejonizujące PEM [1].

Oddziaływanie fal radiowych z tkankami biologicznymi zachodzi głównie poprzez proces absorpcji energii fali elektromagnetycznej. Tkanki organizmu, zawierające duże ilości wody i jonów, wykazują właściwości dielektryczne i przewodzące, które determinują sposób pochłaniania energii pola. Pamiętamy, że zarówno pole elektryczne, jak i magnetyczne związane jest z powstawaniem pewnych sił, które działają na ładunki elektryczne. Ładunkami takimi są jony obecne w tkankach i płynach ustrojowych, a pole elektromagnetyczne może zmieniać ich trajektorie, może je zwalniać lub przyspieszać. W szczególności może powodować ich drgania. Podobnie jest z cząsteczkami wody, których jest w tkankach żywych organizmów bardzo dużo. Są one dipolami elektrycznymi, tzn. że rozkład ładunku elektrycznego w obrębie ich cząsteczek jest niejednorodny, jedna część jest dodatnia a druga ujemna. Na obiekt o niesymetrycznym rozkładzie ładunku składowe elektryczna i magnetyczna również wpływają wywołując ich drgania. Wszystkie te procesy w praktyce prowadzą do zjawiska ogrzewania dielektrycznego, czyli wzrostu temperatury tkanek w obszarze ekspozycji. Temperatura jest bowiem miarą energii wewnętrznej materiału, tj. sumy energii związanej z wszystkimi rodzajami drgań i ruchów cząsteczek ośrodka. Mechanizm ten jest dobrze opisany i stanowi podstawę zarówno oceny bezpieczeństwa, jak i niektórych zastosowań terapeutycznych niejonizującego PEM [1], [2], [4].

Miarą tempa pochłaniania energii fali elektromagnetycznej penetrującej tkanki biologiczne jest współczynnik absorpcji swoistej (Specific Absorption Rate – SAR). Parametr ten wyrażany jest w watach na kilogram (W/kg) i stanowi kluczowe narzędzie w ocenie ekspozycji pacjentów na pola elektromagnetyczne. Wartość SAR zależy od częstotliwości fali, jej natężenia, geometrii ekspozycji oraz właściwości fizycznych tkanek. Z tego względu nie istnieje uniwersalna „bezpieczna moc” pola elektromagnetycznego – bezpieczeństwo zawsze oceniane jest w kontekście konkretnej sytuacji, czy też konkretnego zastosowania [2], [3]. Wytyczne dotyczące dopuszczalnych poziomów ekspozycji na PEM zostały opracowane w oparciu o mechanizmy fizyczne i biologiczne, a nie o pojedyncze doniesienia eksperymentalne. Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) przyjmuje wciąż konserwatywne limity, które uwzględniają znaczne marginesy bezpieczeństwa i odnoszą się do najlepiej udokumentowanego mechanizmu oddziaływania, jakim jest efekt termiczny [2]. Takie podejście zapewnia spójność regulacyjną oraz możliwość bezpiecznego stosowania technologii radiowych w medycynie.

Zrozumienie fizycznych podstaw oddziaływania fal radiowych z organizmem człowieka pozwala uniknąć błędnych interpretacji i nadużyć pojęciowych. Fale radiowe nie „przenoszą informacji biologicznej”, nie „dostrajają” narządów, czy też nie działają selektywnie na konkretne procesy metaboliczne, fizjologiczne albo patologiczne. Ich oddziaływanie wynika z uniwersalnych praw fizyki, które można opisać, kontrolować, które zostały zbadane i potwierdzone w licznych eksperymentach. Na tym fundamencie opierają się zarówno metody diagnostyczne, jak i terapeutyczne omawiane w dalszych częściach artykułu.

Fakt, że podczas propagacji fali radiowej w tkankach dochodzi do przekazywania części energii fali cząsteczkom i atomom ośrodka, czyli innymi słowy następuje absorpcja energii, stanowi podstawę metod diagnostycznych i terapeutycznych w medycynie, które wykorzystują tego rodzaju czynnik. Skoro fala jest absorbowana, to może przekazać tkankom energię i ją ogrzać w mniejszym lub większym stopniu prowadząc do pożądanego efektu terapeutycznego. Istnieje również możliwość pomiaru „ilości” zaabsorbowanej energii, która zależy od właściwości tkanek, co pozwala wyciągać wnioski o tych właściwościach.

3. Bezpieczeństwo i regulacje

Kwestia bezpieczeństwa stanowi kluczowy element wszelkich zastosowań niejonizujących PEM zarówno w życiu codziennym, jak i w medycynie. Szczególnie zastosowania kliniczne fal radiowych podlegają ścisłym regulacjom opartym na wieloletnich badaniach naukowych. Regulacje te nie wynikają z arbitralnych założeń, lecz z analizy najlepiej udokumentowanych mechanizmów oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizm człowieka.

Jak wspomniano wcześniej najważniejszym pojęciem w ocenie bezpieczeństwa ekspozycji na fale radiowe jest współczynnik SAR, który określa tempo pochłaniania energii pola elektromagnetycznego przez tkanki biologiczne. Stanowi on ilościową miarę oddziaływania PEM na organizm. Parametr ten zależy od częstotliwości pola, jego natężenia, czasu ekspozycji oraz właściwości fizycznych tkanek, takich jak przewodnictwo i zawartość wody [1], [13]. Limity określone dla SAR zapewniają, z dodatkowym marginesem bezpieczeństwa, że urządzenia emitujące PEM nie spowodują nadmiernego ogrzewania organizmów użytkowników. Nadmierne, to znaczy powyżej poziomów możliwych do kompensacji przez naturalne procesy termoregulacji. Założenia te pozwalają na ustalenie bezpiecznych parametrów pola w sensie technicznym, tzn. ich natężenia w zależności od zastosowanych częstotliwości. W zależności od tego, o której części widma niejonizujących fal elektromagnetycznych mowa definiuje się bezpieczne limity dla natężenia składowych magnetycznej (A/m) i elektrycznej (V/m) pola oraz dla gęstości mocy (W/m²).

Regulacje prawne przyjmowane przez poszczególne państwa odnośnie bezpiecznej ekspozycji najczęściej (w tym również w Polsce) opierają się o wytyczne opracowane przez Międzynarodową Komisję ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) w szerokim zakresie częstotliwości, od 100 kHz do 300 GHz. Nie tylko zostały one ustalone w oparciu o najlepiej udokumentowany mechanizm oddziaływania (jakim jest efekt termiczny) ale uwzględniają również znaczne marginesy bezpieczeństwa w stosunku do

progów, przy których mogłyby wystąpić niekorzystne efekty biologiczne [13]. Takie podejście zapewnia spójność regulacyjną oraz ochronę zarówno pacjentów, jak i personelu medycznego.

Szczególnym przypadkiem zastosowania fal radiowych w medycynie jest tomografia rezonansu magnetycznego (Magnetic Resonance Imaging – MRI). W trakcie badania MRI pacjent poddawany jest działaniu kilku czynników równocześnie, tj. silnego statycznego pola magnetycznego, zmiennych gradientów pola oraz impulsów fal radiowych. Każdy z tych elementów podlega osobnym limitom bezpieczeństwa, a systemy MRI są projektowane w taki sposób, aby automatycznie kontrolować poziom SAR i zapobiegać przekroczeniu dopuszczalnych limitów. W praktyce klinicznej oznacza to, że nawet długotrwałe i zaawansowane sekwencje obrazowania odbywają się w warunkach ściśle monitorowanej i bezpiecznej ekspozycji [2].

Ocena bezpieczeństwa fal radiowych obejmuje również perspektywę zdrowia publicznego. Przykładem są działania Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer – IARC) działającej w strukturach WHO. IARC, na podstawie analizy aktualnych doniesień naukowych, ocenia prawdopodobieństwo z jakim różnego rodzaju czynniki (w tym fizyczne) mogą przyczyniać się do rozwoju choroby nowotworowej. IARC zaklasyfikowała niejonizujące promieniowanie radiowe do grupy 2B, czyli do czynników „możliwie rakotwórczych”. Klasyfikacja ta nie oznacza udowodnionego związku przyczynowego, lecz wskazuje na ograniczone dowody epidemiologiczne i potrzebę dalszych badań. Warto podkreślić, że do tej samej kategorii należą liczne czynniki środowiskowe o powszechnym występowaniu [14].

Odnosnie wpływu fal radiowych na zdrowie WHO stoi na stanowisku, że przy ekspozycjach zgodnych z obowiązującymi limitami nie istnieją przekonujące dowody na ich negatywny wpływ. Zwraca się jednocześnie uwagę na znaczenie ciągłego monitorowania stanu wiedzy naukowej oraz aktualizacji zaleceń w miarę pojawiania się nowych danych [11]. Takie podejście odzwierciedla zasadę ostrożności, która jest fundamentem regulacji w obszarze technologii medycznych.

Z punktu widzenia pacjenta istotne jest, że bezpieczeństwo fal radiowych w medycynie nie opiera się na deklaracjach producentów, lecz na mierzalnych parametrach fizycznych, procedurach certyfikacyjnych oraz niezależnych ocenach instytucji międzynarodowych. Regulacje te odróżniają zastosowania kliniczne od rozwiązań paramedycznych, które często nie podlegają porównywalnym standardom kontroli. Właśnie ta różnica stanowi jeden z najważniejszych wyznaczników odpowiedzialnego wykorzystania niejonizujących PEM w medycynie i dietetyce.

4. Ciało człowieka jako ośrodek elektromagnetyczny

Z punktu widzenia fizyki ciało człowieka nie jest jednorodne, lecz stanowi złożony i silnie zróżnicowany ośrodek elektromagnetyczny. Tkanki różnią się właściwościami związanymi z przepływem prądu elektrycznego i oddziaływaniem z falami radiowymi. Przepływ prądu

elektrycznego zależy od wielkości nazywanej przewodnictwem elektrycznym, która w uproszczeniu mówi jak dobrym przewodnikiem jest materiał, w którym płyną w sposób uporządkowany ładunki. W praktyce operuje się również pojęciem oporu właściwego, który jest odwrotnością przewodnictwa. Oddziaływanie z PEM w zakresie wyższych częstotliwości jest charakteryzowane przede wszystkim przez przenikalność dielektryczną. Zarówno przewodnictwo, jak i przenikalność dielektryczna zależą od liczby nośników prądu w tkankach oraz od zawartości wody i decydują o sposobie, w jaki fale radiowe rozchodzą się w organizmie, są pochłaniane oraz ulegają rozproszeniu. Kluczowy przy tym jest fakt, że oddziaływanie PEM z ciałem ma charakter fizyczny i podlega prawom możliwym do opisu ilościowego [8], [9], [10].

Jak wspomniano wyżej, jednym z najważniejszych czynników determinujących interakcje pomiędzy tkankami i falą radiową jest ich skład wodno-elektrolitowy. Woda, której cząstki są polarne (niesymetryczny rozkład ładunku) ze względu na swoje właściwości dielektryczne, odgrywa dominującą rolę w absorpcji energii elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości radiowych. Tkanki o wysokiej zawartości wody, takie jak mięśnie czy narządy jamy brzusznej, wykazują inne właściwości elektromagnetyczne niż tkanka tłuszczowa czy tkanka kostna. Zależności te zostały szczegółowo opisane i są łatwo dostępne w wielu publikacjach związanych z badaniami nad parametrami dielektrycznymi tkanek biologicznych [8].

Porównując układ pokarmowy z innymi układami organizmu człowieka należy zauważyć jego wyjątkową zmienność w czasie, a przynajmniej w odniesieniu do przewodności pokarmowej. Właściwości elektromagnetyczne jelit i innych narządów jamy brzusznej zależą nie tylko od rodzaju tkanek, lecz również od aktualnej zawartości przewodności pokarmowej, stopnia nawodnienia, obecności gazów oraz aktywności perystaltycznej. Układ pokarmowy stanowi więc dynamiczny ośrodek elektromagnetyczny, którego parametry ulegają ciągłym zmianom fizjologicznym [9], [10].

Do opisu właściwości elektromagnetycznych w praktyce wykorzystywane jest pojęcie impedancji, które odnosi się do zespolonego oporu elektrycznego materiału. Impedancja zależy od własności elektrycznych, ale również od własności dielektrycznych tkanek. W przypadku tkanek biologicznych często używa się określenia „bioimpedancja”. Bioimpedancja tkanki zależy od jej struktury i składu oraz od częstotliwości przyłożonego pola. Pomiar bioimpedancji pozwala wnioskować o zawartości wody i rozmieszczeniu płynów ustrojowych oraz określać ich zmiany w czasie, na przykład po posiłku lub w trakcie procesów trawiennych. Z tego względu metody bioimpedancji znalazły zastosowanie zarówno w praktyce klinicznej, jak i w badaniach naukowych związanych z układem pokarmowym [9], [10].

Istotne jest, że odpowiedź organizmu na fale radiowe ma charakter przewidywalny i powtarzalny oraz pozwala na badanie zmiennych fizjologicznych. Modele opisujące rozkład PEM w ciele człowieka opierają się na znanych wartościach parametrów dielektrycznych tkanek z uwzględnieniem geometrii badanych obszarów wynikającej z anatomii ciała

człowieka. Dzięki temu możliwe jest projektowanie systemów diagnostycznych i terapeutycznych, które wykorzystują fale radiowe w sposób kontrolowany i bezpieczny [8], [9].

5. Diagnostyka oparta na falach radiowych

Jednym z kierunków rozwoju współczesnej diagnostyki medycznej są metody nieinwazyjne, które pozwalałyby uzyskiwać informacje o stanie organizmu bez konieczności stosowania promieniowania jonizującego. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskują techniki wykorzystujące fale radiowe z zakresu mikrofalowego, których oddziaływanie z organizmem opiera się na dobrze poznanych właściwościach dielektrycznych tkanek. Metody te nie konkurują jeszcze bezpośrednio z klasycznymi technikami obrazowania znanymi w radiologii – jak tomografia komputerowa (rentgenowska), czy cyfrowa radiografia – lecz uzupełniają je nowymi informacjami diagnostycznymi i funkcjonalnymi.

Jak wynika z poprzednich rozdziałów, podstawą diagnostyki opartej na falach radiowych jest fakt, że różne tkanki biologiczne charakteryzują się odmiennymi parametrami elektromagnetycznymi, takimi jak przenikalność dielektryczna i przewodnictwo elektryczne. Różnice te wpływają na interakcje pomiędzy tkankami i falą, czyli na tłumienie fali oraz jej rozpraszanie. Właśnie na tej zasadzie bazuje tomografia mikrofalowa, która wykorzystuje pomiary PEM do rekonstrukcji rozkładu właściwości dielektrycznych badanych obszarów [15].

Wczesne prace nad tomografią mikrofalową pokazały, że obrazowanie struktur biologicznych z zastosowaniem mikrofal jest możliwe w warunkach laboratoryjnych. Badania Semenova i współpracowników pokazały, że różnice dielektryczne tkanek mogą być wykorzystane do tworzenia obrazów dwuwymiarowych, choć z rozdzielczością istotnie niższą niż te, jakie uzyskuje się w metodach rentgenowskich [15]. Z perspektywy niniejszego artykułu istotne jest jednak podkreślenie, że większość zaawansowanych badań klinicznych nad tomografią mikrofalową dotyczyła dotychczas innych narządów niż elementy układu pokarmowego, może poza obrazowaniem wątroby [16]. Nie wszystkie lokalizacje w ciele człowieka są równe łatwe do obrazowania w tomografii mikrofalowej, tak jak na przykład piersi. W tym przypadku powstały już prototypy klinicznych systemów obrazowania mikrofalowego [17]. Przeglądy literatury wskazują natomiast, że technologia ta znajduje się na etapie badań w kontekście nowych zastosowań, a jej potencjalne wykorzystanie w diagnostyce jamy brzusznej i przewodu pokarmowego wymaga dalszej walidacji [18]. Ograniczenia te wynikają m.in. z dużej zmienności fizjologicznej układu pokarmowego oraz z jego złożonej geometrii, która wymaga zastosowania metod o rozdzielczości przestrzennej większej niż uzyskiwana do tej pory.

Odrębnym, lecz istotnym obszarem zastosowań fal radiowych w diagnostyce są techniki monitorowania procesów zachodzących w czasie wewnątrz układu pokarmowego, a dokładniej w przewodzie pokarmowym. Czujniki radiowe oraz systemy telemetryczne umożliwiają długotrwałe, ciągłe zbieranie danych fizjologicznych bez konieczności hospitalizacji pacjenta. Szczególnie interesującym przykładem są kapsułki diagnostyczne, które po połknięciu przemieszczają się przez przewód pokarmowy, rejestrując parametry takie jak temperatura, pH czy czas pasażu, a następnie przesyłają dane drogą radiową [19].

Zwróćmy jednak uwagę, że kapsułki diagnostyczne nie wykorzystują fal radiowych do bezpośredniego badania tkanek, lecz do bezpiecznej transmisji informacji z wnętrza organizmu. Ich znaczenie polega na umożliwieniu nieinwazyjnego monitorowania funkcji przewodu pokarmowego w warunkach codziennej aktywności pacjenta. Takie podejście wpisuje się w szerszy trend rozwoju diagnostyki funkcjonalnej, w której coraz większą rolę odgrywa analiza sygnałów fizycznych i ich zmienności w czasie [19].

Fale radiowe i mikrofałe znajdują również zastosowanie pośrednie w monitorowaniu procedur terapeutycznych. Przykładem są badania nad wykorzystaniem tomografii mikrofalowej do kontroli rozkładu temperatury podczas zabiegów ablacyjnych w wątrobie. Choć prace te dotyczą głównie zastosowań eksperymentalnych i badań *ex vivo*, pokazują one potencjał tomografii mikrofalowej jako narzędzia wspomagającego diagnostykę i kontrolę terapii [16]. Przykład ten jest o tyle interesujący, że proponuje się w nim zastosowanie mikrofal w diagnostyce do kontrolowania efektów terapii nowotworowej (termoablacji mikrofalowej), która również wykorzystuje mikrofałe.

Diagnostyka oparta na falach radiowych i mikrofalach stanowi dynamicznie rozwijający się obszar inżynierii biomedycznej, chociaż realne kliniczne jej zastosowania są nadal nieliczne. Główną zaletą takich rozwiązań jest ich nieinwazyjność oraz możliwość długotrwałego monitorowania pacjenta bez narażania go na promieniowanie jonizujące. W kontekście układu pokarmowego technologie te będą miały raczej charakter uzupełniający, a ich pełny potencjał kliniczny zależy od dalszych badań, standaryzacji metod oraz integracji z innymi technikami diagnostycznymi.

6. Tomografia rezonansu magnetycznego

Tomografia rezonansu magnetycznego często (choć nieprecyzyjnie) określana jako rezonans magnetyczny, jest najbardziej zaawansowanym klinicznym przykładem zastosowania fal radiowych w medycynie. Jest to bardzo zaawansowana metoda, która w potocznym odbiorze jest głównie kojarzona z bardzo silnym polem magnetycznym. Kluczową rolę w procesie obrazowania tą metodą odgrywają jednak fale radiowe, które umożliwiają wzbudzenie i detekcję sygnałów pochodzących z wnętrza organizmu. MRI jest jednocześnie techniką obrazowania, która nie wymaga stosowania promieniowania jonizującego, co czyni ją szczególnie cenną w medycznej diagnostyce obrazowej w ogóle, a narządów jamy brzusznej i przewodu pokarmowego w szczególności.

Fizyczną podstawą MRI jest zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego. Zjawisko to dotyczy jąder atomowych, które posiadają niezerowy spin jądrowy, a co za tym idzie niezerowy moment magnetyczny. Jednym z takich jąder jest jądro wodoru. To właśnie jądra wodoru są stosowane w obrazowaniu, ponieważ są niezwykle liczne w tkankach biologicznych ze względu na dużą zawartość wodoru we wszystkich związkach organicznych oraz w wodzie. Moment magnetyczny jądra można rozumieć, jako mikroskopijną igłę kompasu, która w zewnętrznym polu magnetycznym ustawia się zgodnie z kierunkiem sił

tego pola. W silnym, jednorodnym polu magnetycznym spiny jąder wodoru ulegają uporządkowaniu, a następnie są wzbudzone za pomocą impulsów fal radiowych o ściśle dobranej częstotliwości. Wzbudzenie to polega na zmianie orientacji niektórych spinów i wiąże się z absorpcją energii zastosowanej fali radiowej. Po zakończeniu impulsu jądra wodoru powracają do stanu uporządkowania, emitując zgromadzoną wcześniej energię w postaci sygnału radiowego. Sygnał ten jest rejestrowany przez system detekcyjny aparatu MRI i jest podstawą do rekonstrukcji obrazu tkanek [20], [21].

Istotne jest podkreślenie, że fale radiowe w MRI nie tworzą obrazu bezpośrednio. Pełnią one rolę czynnika wzbudzającego, który umożliwia uzyskanie sygnału niosącego informację o lokalnych właściwościach fizycznych tkanek, takich jak czasy relaksacji opisujące oddziaływanie spinów jądrowych z otoczeniem czy liczba jąder wodoru w jednostce objętości. Właściwości te zależą od rodzaju obrazowanych tkanek, a to znaczy, że pozwalają je różnicować na rekonstruowanych obrazach. Sygnały uzyskane podczas badania podlegają zaawansowanej obróbce i ostatecznie prowadzą do uzyskania obrazów anatomicznych i funkcjonalnych [20].

Z punktu widzenia diagnostyki układu pokarmowego MRI oferuje wyjątkowe możliwości bezinwazyjnego i całkowicie bezpiecznego obrazowania tkanek miękkich bez konieczności stosowania promieniowania jonizującego. Metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w diagnostyce chorób wątroby, dróg żółciowych oraz jelit. Szczególnym przykładem jest enterografia rezonansu magnetycznego, która umożliwia ocenę ściany jelita, motoryki oraz rozkładu płynów w świetle przewodu pokarmowego [21], [22], [23] w trakcie wirtualnej endoskopii. Trójwymiarowy obraz układu pokarmowego jest prezentowany tak, jakby obserwator znajdował się w świetle przewodu pokarmowego i mógł go obserwować od wewnątrz. Podobną technikę można zastosować w przypadku badania dróg żółciowych i trzustkowych (Magnetic Resonance Cholangiopancreatography – MRCP), a obecnie próbuje się tego rodzaju metody wspomagać algorytmami uczenia maszynowego w celu diagnostyki różnicowej nowotworów [24].

W ostatnich latach coraz większe znaczenie zyskują techniki MRI umożliwiające ocenę funkcji przewodu pokarmowego, a nie tylko jego struktury anatomicznej. Badania wykorzystujące sekwencje dynamiczne pozwalają analizować perystaltykę jelit, pasaż treści pokarmowej oraz dystrybucję płynów w czasie rzeczywistym. Prace Hoad i współpracowników wskazują, że funkcjonalne obrazowanie MRI układu pokarmowego może w przyszłości osiągnąć podobną rolę kliniczną, jaką obecnie pełni rezonans magnetyczny w trybie filmowym (cine-MRI) w kardiologii [22].

MRI uważa się za technikę całkowicie bezpieczną i niewiele osób zdaje sobie sprawę z tego, że zastosowanie fal radiowych może stanowić pewne zagrożenie dla pacjenta. Szczególnie w przypadku pacjentów otyłych wymagana intensywność fali radiowej może być tak duża, że mogłaby doprowadzić do przegrzania się tkanek pacjenta. Z tego powodu absorpcja energii elektromagnetycznej przez tkanki podczas badania MRI jest ściśle monitorowana za

pomocą parametrów takich jak SAR. Nowoczesne systemy MRI są projektowane w taki sposób, aby ekspozycja pacjenta na fale radiowe pozostawała znacznie poniżej obowiązujących limitów bezpieczeństwa, nawet podczas zaawansowanych sekwencji obrazowania [20], [21].

Tomografia rezonansu magnetycznego stanowi modelowy przykład racjonalnego wykorzystania niejonizującego PEM w medycynie. Łączy ona głębokie zrozumienie mechanizmów fizycznych z zaawansowaną technologią inżynierską oraz rygorystycznymi procedurami bezpieczeństwa. Jako ciekawostkę można dodać, że metoda ta jest jedną z niewielu metod stosowanych praktycznie, które potwierdzają i bezpośrednio wykorzystują założenia mechaniki kwantowej.

7. Terapia z wykorzystaniem niejonizujących pól elektromagnetycznych

Zastosowanie niejonizującego PEM w terapii różni się zasadniczo od jego wykorzystania diagnostycznego. W diagnostyce celem jest pozyskanie informacji o stanie tkanek, a w terapii pole elektromagnetyczne ma wywołać kontrolowany efekt biologiczny. Podstawowe znaczenie ma tu odpowiedni i precyzyjny wybór parametrów oddziałującego pola, czyli jego częstotliwości, natężenia oraz czasu ekspozycji. Należy również uwzględnić trójwymiarową geometrię obszaru, który ma podlegać terapii.

Najlepiej poznanymi i stosowanymi w praktyce klinicznej formami terapii opartej o zastosowanie fal radiowych są hipertermia oraz diatermia. Obydwie metody opierają się na kontrolowanym ogrzewaniu tkanek w wyniku absorpcji energii dostarczanej zmienne pole elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości. Niewielki wzrost temperatury prowadzi m.in. do rozszerzenia naczyń krwionośnych, poprawy perfuzji oraz zmniejszenia napięcia mięśniowego. W przypadku wyraźnego wzrostu temperatury tkanek przez odpowiednio długi czas może dojść do denaturacji białek i w efekcie do zniszczenia tkanki. Takie postępowanie również można uznać za terapeutyczne w przypadku, gdy celem jest właśnie zniszczenie tkanki, np. w przypadku choroby nowotworowej. Hipertermia znajduje najszersze zastosowanie w onkologii, a mechanizmy fizyczne leżące u jej podstaw są uniwersalne i dobrze opisane [25], [26]. Generowany lokalnie z zewnątrz niewielki wzrost temperatury (do 40-44°C) może wspierać w zastosowaniach onkologicznych klasyczne metody terapii nowotworowej jak radioterapia, czy chemioterapia [27] również w przypadku nowotworów jelit, żołądka, wątroby i trzustki. Znaczne wzrosty temperatury (90-105°C) niszczą tkanki nowotworowe bezpośrednio i skutecznie dzięki czemu są podstawą metod ablacyjnych [28]. Mogą one być wykorzystywane w leczeniu choroby nowotworowej w przypadku nowotworów wątroby i trzustki [29], [30]. W tym przypadku pole o częstotliwościach mikrofalowych generowane jest lokalnie przy pomocy anteny umieszczonej bezpośrednio w guzie.

W kontekście układu pokarmowego zainteresowanie terapią z wykorzystaniem fal radiowych dostarczanych przy pomocy aplikatorów zewnętrznych (diatermia mikrofalowa i krótkofalowa) dotyczy przede wszystkim potencjalnego wpływu na mięśnie gładkie oraz lokalne mikrokrążenie. Oddziaływanie to ma jednak charakter pośredni i fizjologiczny, a nie selektywnie „lecniczy”. Oznacza to, że efekty obserwowane w obrębie przewodu

pokarmowego wynikają głównie z mechanizmów termicznych np. ze zmian ukrwienia, a nie z bezpośredniego oddziaływania PEM na poziomie procesów molekularnych [25], [26].

Należy mieć na uwadze, że parametry stosowanych fal radiowych, a co za tym idzie, skuteczność terapii, zależą od rodzaju tkanki, jej właściwości elektromagnetycznych, głębokości (odległości od powierzchni ciała) oraz stanu fizjologicznego pacjenta. Jest to pewnego rodzaju ograniczenie, które powoduje, że metody terapeutyczne oparte na falach radiowych wymagają ścisłego nadzoru medycznego oraz indywidualnego dostosowania do konkretnych zastosowań [26]. Z tego też powodu ich stosowanie jest trudne w przypadku układu pokarmowego, który charakteryzuje się skomplikowaną geometrią, o czym wspomniano już wcześniej w przypadku tomografii mikrofalowej. Znaczna część badań nad skutecznością elektromagnetycznej diatermii mikrofalowej i krótkofalowej dotyczy układu mięśniowo-szkieletowego. Przeglądy systematyczne wskazują w tym przypadku na pewne umiarkowane efekty kliniczne w leczeniu bólu i napięcia mięśniowego, jednak ich bezpośrednia ekstrapolacja na układ pokarmowy [31] jest bardzo trudna z ww. względów.

Granica między medycyną opartą na dowodach naukowych a pseudonauką w obszarze pól elektromagnetycznych bywa szczególnie cienka. W przestrzeni publicznej często pojawiają się twierdzenia o „energetycznym strojeniu narządów albo patogenów” czy „harmonizacji częstotliwości”, które nie mają oparcia w fizyce ani biologii. Przykładem tego rodzaju metod jest tzw. „biorezonans”. W przeciwieństwie do takich narracji, kliniczne zastosowania fal radiowych opierają się na mierzalnych efektach fizycznych, jasno określonych parametrach i rygorystycznej kontroli bezpieczeństwa.

Podsumowując, terapeutyczne wykorzystanie niejonizującego PEM ma charakter najczęściej wspomagający i uzupełniający, a nie zastępujący klasyczne metody leczenia. W kontekście układu pokarmowego obszar ten pozostaje w dużej mierze eksperymentalny i wymaga dalszych badań klinicznych. Jednocześnie stanowi on przykład tego, jak ta sama fizyka fal radiowych i ich interakcji z tkankami może prowadzić do bardzo różnych zastosowań, w zależności od tego, czy celem jest pomiar (diagnostyka), czy interwencja terapeutyczna. Stwierdzeniu temu wydają się nie podlegać dość drastyczne metody ablacyjne stosowane w wielu dziedzinach chirurgii, a w szczególności w onkologii układu pokarmowego.

8. Fale radiowe a mikrobiom jelitowy

Mikrobiom jelitowy jest jednym z najbardziej dynamicznych i złożonych elementów związanych z układem pokarmowym. Tworzy go ogromna liczba mikroorganizmów, których aktywność metaboliczna pozostaje w ścisłej relacji z dietą, funkcją bariery jelitowej oraz układem odpornościowym. Masa mikrobiomu dorosłego człowieka może dochodzić do 2 kg, a jego skład jest unikalny dla każdej osoby. Ze względu na rosnące zainteresowanie mikrobiomem jako czynnikiem wpływającym na zdrowie, w literaturze naukowej pojawiają się również pytania o potencjalny wpływ niejonizującego PEM, w tym fal radiowych, na bakterie jelitowe i ich funkcjonowanie. Interpretacja wyników dostępnych badań wymaga jednak dużej ostrożności. Większość prac dotyczących biologicznych efektów niejonizującego

PEM opiera się na eksperymentach *in vitro* lub na uproszczonych modelach biologicznych [32]. Obserwacje zmian wzrostu, metabolizmu czy ekspresji genów badanych w takich warunkach mikroorganizmów nie mogą być bezpośrednio przenoszone na warunki panujące w przewodzie pokarmowym człowieka.

Mikrobiom jelitowy funkcjonuje w środowisku o bardzo specyficznych właściwościach fizykochemicznych. Wpływa na niego mają temperatura, pH, dostępność substancji odżywczych, obecność enzymów trawiennych oraz interakcje z komórkami układu pokarmowego gospodarza. Bardziej prawdopodobne jest, że o ile w ogóle PEM wpływa na mikrobiom jelitowy, to nie jest to bezpośredni wpływ na same mikroorganizmy wchodzące w jego skład, a wpływ pośredni poprzez zmiany parametrów środowiska, takich jak lokalna temperatura czy stężenia jonów.

Z punktu widzenia fizyki oddziaływanie fal radiowych z układami biologicznymi odbywa się za pośrednictwem mechanizmów termicznych. Energia fal radiowych przy poziomach ekspozycji zgodnych z obowiązującymi limitami bezpieczeństwa nie jest zdolna do wywoływania specyficznych efektów molekularnych [1], [2]. Ten fakt jest mocnym argumentem przemawiającym za tezą, że ewentualny wpływ na mikrobiom jelitowy musiałby wynikać pośrednio ze zmian warunków fizjologicznych.

W literaturze pojawiają się liczne prace sugerujące możliwość generowania zmian w mikrobiomie jelitowym wywoływanych przez PEM, jednak sami autorzy takich badań często podkreślają ograniczenia metodologiczne swoich prac. Brakuje badań klinicznych, które jednoznacznie wykazywałyby istotne i powtarzalne zmiany składu lub funkcji mikrobiomu jelitowego w wyniku ekspozycji na fale radiowe w warunkach eksperymentalnych lub środowiskowych [32]. Wszelkie twierdzenia o bezpośrednim wpływie PEM na mikrobiom należy traktować więc raczej jako spekulacje. Taki stan wiedzy stoi w sprzeczności do często spotykanych narracji marketingowych, które przypisują PEM właściwości regulujące równowagę mikroflory bakteryjnej w jelitach.

9. Pole elektromagnetyczne a insulinooporność

Znakomitym przykładem kontrowersji związanych z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na układ pokarmowy i wynikających z tego oddziaływania konsekwencji jest insulinooporność. Jest to jedno z zaburzeń metabolicznych prowadzących do rozwoju niektórych chorób cywilizacyjnych, w tym cukrzycy typu 2. Jej istotą jest zmniejszona wrażliwość tkanek na działanie insuliny, pomimo jej prawidłowego lub podwyższonego stężenia we krwi. Ponieważ insulina produkowana przez trzustkę jest najważniejszym z hormonów odpowiedzialnych za regulację metabolizmu cukru w organizmie, to konsekwencją są pogłębiające się zaburzenia homeostazy glukozy oraz postępujące zmiany metaboliczne. Oprócz dobrze poznanych czynników ryzyka, takich jak dieta, siedzący tryb życia czy predyspozycje genetyczne, coraz częściej rozpatruje się także rolę czynników środowiskowych, w tym ekspozycji na pole elektromagnetyczne [33].

Analiza dostępnych badań wskazuje, że potencjalne oddziaływanie PEM na metabolizm glukozy może zachodzić na drodze kilku mechanizmów. Wśród nich wymienia się modulację stresu oksydacyjnego, wpływ na aktywność enzymów i ekspresję genów regulujących metabolizm komórkowy, a także oddziaływanie na hormony stresu uczestniczące w regulacji gospodarki węglowodanowej. Badano również zmiany w funkcjonowaniu autonomicznego układu nerwowego prowadzące do zaburzeń równowagi insulina/glukagon oraz zmiany w poziomie cytokin prozapalnych, które odgrywają istotną rolę w patogenezie insulinooporności. Poprzez rozszerzenie naczyń krwionośnych i poprawę perfuzji tkanek, pole elektromagnetyczne może wpływać na transport glukozy do komórek i pośrednio modulować wrażliwość insulinową zarówno dodatnio, jak i negatywnie [33].

Ostatni przykład pokazuje jasno, że wyniki badań eksperymentalnych i obserwacyjnych nie są jednoznaczne. Część doniesień wskazuje na potencjalnie niekorzystne skutki ekspozycji, zwłaszcza w przypadku pól z zakresu ekstremalnie niskich częstotliwości. Wykazano m.in. wzrost stężenia reaktywnych form tlenu, zwiększenie poziomu glukagonu, a także osłabienie wydzielania insuliny. Badania kliniczne oraz eksperymenty na modelach zwierzęcych wskazują, że ekspozycja na pola o częstotliwości 50-60 Hz może prowadzić do wzrostu glikemii oraz obniżenia stężenia insuliny. Długotrwała ekspozycja środowiskowa, zwłaszcza w warunkach wysokiego natężenia PEM, może więc sprzyjać rozwojowi insulinooporności i cukrzycy [33], [34]. Z drugiej strony coraz więcej danych sugeruje, że odpowiednio dobrane parametry pola elektromagnetycznego mogą wykazywać działanie korzystne. Badania na modelach zwierzęcych wskazują, że niskoczęstotliwościowe oraz impulsowe PEM może prowadzić do obniżenia poziomu glukozy we krwi oraz poprawy wrażliwości tkanek na insulinę [35]. Działanie to może być dodatkowo wspierane przez poprawę mikrokrążenia oraz metabolizmu tkanek na poziomie komórkowym. W badaniach klinicznych i pilotażowych obserwowano ponadto, że terapia z wykorzystaniem impulsowego PEM może poprawiać perfuzję naczyń obwodowych, co ma znaczenie w kontekście kontroli glikemii oraz powikłań naczyniowych cukrzycy. Doniesienia te sugerują, że ekspozycja na PEM może pełnić rolę terapii wspomagającej, zwłaszcza w połączeniu z innymi interwencjami metabolicznymi, takimi jak modyfikacja diety czy aktywność fizyczna [36], [37].

Nawet jeśli pominiemy ważną obserwację wyartykułowaną już wcześniej, że absorpcja fal radiowych przy poziomach ekspozycji zgodnych z obowiązującymi limitami bezpieczeństwa nie prowadzi do efektów na poziomie molekularnym, a jedynie zwiększa temperaturę tkanek, to potencjalny związek między parametrami pola a insulinoopornością musi mieć charakter bardzo złożony. Wpływ pola musi w tym przypadku silnie zależeć od parametrów ekspozycji, takich jak częstotliwość, natężenie, czas oddziaływania oraz stan metaboliczny organizmu, ale również rodzaj organizmu. Wszystko to sprawia, że wnioski z pojawiających się w literaturze doniesień są bardzo trudne do przeniesienia na człowieka.

Większość prac dotyczących insulinooporności i związków PEM z cukrzycą dotyczy wolnozmiennego pola elektromagnetycznego. Wynika to z możliwości potencjalnych

zastosowań magnetoterapii w terapii cukrzycy, ale też znacznego narażenia środowiskowego na pola o niskich częstotliwościach. Prace dotyczące wpływu PEM o częstotliwościach z zakresów radiowych również się pojawiają, ale są mniej liczne [38], [39], [40]. Wskazują raczej na niekorzystny wpływ tego rodzaju pola w kontekście zagrożenia insulinoopornością, ale charakteryzują się podobnymi ograniczeniami jak cytowane wyżej publikacje dotyczące pola wolnozmiennego, tj. dotyczą modeli zwierzęcych, ekspozycji niewystępujących w środowisku, a ponadto liczebności badanych populacji są mocno ograniczone i co najważniejsze – brakuje potwierdzenia tych wyników w randomizowanych badaniach klinicznych wysokiej jakości.

10. Dietetyka, metabolizm i pola elektromagnetyczne

Zastosowanie niejonizującego PEM w dietetyce ma inny charakter od tego, który obserwuje się w terapii czy obrazowaniu stricte medycznym. W obszarze nauk o żywieniu fale radiowe nie są raczej stosowane do modyfikowania metabolizmu, ale stanowią narzędzie pomiarowe umożliwiające monitorowanie procesów fizjologicznych, które pozostają kluczowe dla oceny stanu odżywienia i funkcji układu pokarmowego.

Jednym z najważniejszych przykładów takiego zastosowania są opisane wcześniej metody bioimpedancyjne. Przypomnijmy, że bioimpedancja opiera się na pomiarze odpowiedzi elektrycznej organizmu na przyłożone pole elektromagnetyczne o określonej częstotliwości. Odpowiedź ta zależy od zawartości wody, rozmieszczenia płynów ustrojowych oraz rodzaju i struktury tkanek, co czyni ją użytecznym narzędziem w ocenie składu ciała i stanu nawodnienia [9], [10]. Choć techniki te wykorzystują PEM o niskich częstotliwościach, to ich podstawy fizyczne pozostają spójne z ogólnymi zasadami oddziaływania niejonizującego PEM z tkankami biologicznymi.

Z perspektywy dietetyki szczególnie ważna jest możliwość monitorowania zmian zachodzących w organizmie w odpowiedzi na spożycie posiłku. Procesy trawienne prowadzą do dynamicznych zmian w rozmieszczeniu płynów, przewodnictwie treści jelitowej oraz właściwościach elektrycznych tkanek jamy brzusznej. Badania bioimpedancyjne pozwalają rejestrować te zmiany w sposób pośredni, dostarczając bezinwazyjnie informacji o przebiegu procesów trawienia i wchłaniania [9], [10]. W tym zakresie można również łatwo wyobrazić sobie zastosowanie urządzeń monitorujących procesy zachodzące w przewodzie pokarmowym w postaci połykalnych kapsułek diagnostycznych [41].

Istotne jest jednak wyraźne rozróżnienie pomiędzy monitorowaniem metabolizmu a jego modyfikowaniem. Metabolizm jest złożonym zespołem reakcji biochemicznych regulowanych hormonalnie i enzymatycznie, a nie procesem, którym można bezpośrednio „sterować” za pomocą fal radiowych. Dostępna literatura nie dostarcza wiarygodnych dowodów na to, aby niejonizujące PEM mogło selektywnie przyspieszać np. spalanie energii, regulować masę ciała czy wpływać na tempo przemian metabolicznych w sposób klinicznie istotny [9], [10]. Jest to ważne w kontekście licznych twierdzeń marketingowych przypisujących falom

elektromagnetycznym rzekomy wpływ na metabolizm, harmonizację czy też dostrojenie procesów trawiennych.

W kontekście praktyki dietetycznej techniki oparte o zastosowanie fal radiowych mogą również pełnić rolę narzędzi wspomagających personalizację zaleceń żywieniowych. Monitorowanie nawodnienia, zmian beztłuszczowej masy ciała czy odpowiedzi organizmu na interwencje dietetyczne dają, przynajmniej teoretyczną, możliwość dopasowania strategii żywieniowych do indywidualnych potrzeb pacjenta. W tym sensie PEM wspiera dietetykę poprzez dostarczanie danych fizjologicznych, a nie poprzez bezpośrednią ingerencję w procesy metaboliczne.

11. Mikrofałe od kuchni

Podstawowym zadaniem dietetyka jest indywidualny dobór diety pacjenta, dostosowany do jego potrzeb, stanu zdrowia oraz aktualnej kondycji organizmu. W tym celu konieczne jest uwzględnienie charakterystyki spożywanych pokarmów pod względem ilości dostarczanej energii, jakości i ilości składników odżywczych niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmu, a także – w miarę możliwości – ograniczenie obecności substancji, które mogą działać niekorzystnie na zdrowie.

Właściwości spożywanych produktów w dużym stopniu zależą od sposobu ich przygotowania, a w szczególności od rodzaju obróbki termicznej. Jednym z parametrów silnie uzależnionych od tego procesu jest indeks glikemiczny. Przykładowo, indeks glikemiczny ziemniaków różni się w zależności od tego, czy były one gotowane, smażone czy pieczone, a także od temperatury ich spożycia – inny będzie dla potraw spożywanych na ciepło, a inny dla tych spożywanych po schłodzeniu [42]. Należy również pamiętać, że obróbka termiczna może prowadzić do powstawania w żywności substancji potencjalnie szkodliwych [43]. Z tego względu niektóre metody obróbki cieplnej uznaje się za korzystniejsze, a inne za mniej pożądane. Powszechnie zaleca się unikanie smażenia, zwłaszcza z użyciem nieodpowiednio dobranych tłuszczów, natomiast gotowanie uznawane jest za bezpieczniejszą alternatywę. Również w tym przypadku istotne są jednak szczegóły – gotowanie w wodzie i gotowanie na parze nie są metodami równoważnymi pod względem wpływu na wartość odżywczą potraw.

Jedną z form obróbki cieplnej jest ogrzewanie dielektryczne z wykorzystaniem mikrofal, realizowane powszechnie w kuchenkach mikrofalowych. Metoda ta stosowana jest przede wszystkim do podgrzewania żywności, a nie do jej pełnego przygotowywania i od lat budzi pewne kontrowersje. W przestrzeni publicznej funkcjonują opinie, a niekiedy wręcz legendy miejskie, według których stosowanie mikrofal w kuchni jest rozwiązaniem „nienaturalnym” i potencjalnie szkodliwym. Jednym z często przywoływanych argumentów jest denaturacja białek zachodząca podczas ogrzewania dielektrycznego. Choć brzmi to groźnie, w istocie denaturacja białek jest zjawiskiem charakterystycznym dla każdej formy obróbki cieplnej [43]. Właśnie podniesienie temperatury prowadzi do rozpadu struktur przestrzennych białek, co ułatwia dostęp enzymów trawiennych do poszczególnych aminokwasów i sprzyja ich przyswajaniu przez organizm.

Kuchenki mikrofalowe działają poprzez generowanie fal elektromagnetycznych o bardzo dużej mocy (nawet 1000 W) przy częstotliwości około 2,45 GHz. Promieniowanie to oddziałuje głównie z cząsteczkami wody obecnymi w żywności, powodując ich rotacyjne drgania i szybki wzrost energii wewnętrznej, a w konsekwencji temperatury produktu [44], [45]. Ogrzewanie zachodzi w całej objętości pożywienia, jest stosunkowo szybkie i – przy prawidłowym użytkowaniu urządzenia – dość równomierne. W przeciwieństwie do niektórych metod konwencjonalnych nie dochodzi tu do silnego przegrzewania powierzchni produktu i jego przypalania, co ogranicza ryzyko powstawania związków niepożądanych z punktu widzenia zdrowia.

Z tego względu można stwierdzić, że ogrzewanie żywności w kuchenke mikrofalowej jest jedną z bezpieczniejszych i „czystszych” form obróbki cieplnej, o ile stosowane jest zgodnie z zaleceniami producenta i zasadami higieny żywności [46]. Podczas konsultacji dietetycznych warto więc nie tylko omawiać różnice między poszczególnymi metodami obróbki termicznej, lecz także próbować odmitologizować stosowanie kuchenek mikrofalowych jako narzędzia, które – wbrew obiegowym opiniom – może sprzyjać zachowaniu wartości odżywczej posiłków.

12. Przyszłość

Rozwój technologii wykorzystujących niejonizujące PEM w medycynie i dietetyce nie polega na odkrywaniu nowych mechanizmów oddziaływania, lecz na coraz lepszym wykorzystaniu mechanizmów już znanych i pełniejszym wykorzystaniu gromadzonych danych. Dominujące mechanizmy interakcji pola elektromagnetycznego z organizmem są dobrze opisane [1], [11], więc przyszłość tej dziedziny związana jest przede wszystkim z postępem technologicznym, miniaturyzacją elektroniki, rozwojem metod analizy sygnałów oraz integracją danych pochodzących z różnych źródeł diagnostycznych.

Jednym z bardziej obiecujących kierunków rozwoju są systemy monitorowania funkcji układu pokarmowego. Inteligentne kapsułki diagnostyczne oraz sensory połykalne, zdolne do radiowej transmisji danych, umożliwiają zbieranie informacji fizjologicznych w warunkach zbliżonych do codziennego funkcjonowania pacjenta w sposób ciągły. Rozwiązania te są już przedmiotem intensywnych badań, ale nadal nie są stosowane szeroko w rutynowej praktyce klinicznej [19], [41].

Równolegle rozwija się obszar zaawansowanej analizy sygnałów biomedycznych. Na przykład metody sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego coraz częściej wykorzystywane są do przetwarzania dużych zbiorów danych biomedycznych. W przypadku diagnostyki układu pokarmowego z zastosowaniem fal radiowych oznacza to możliwość wydobywania głębiej ukrytej i pełniejszej informacji diagnostycznej z sygnałów, których fizyczna natura pozostaje niezmienną w stosunku do dotychczasowych rozwiązań. Tendencja ta jest dobrze widoczna w rozwoju tzw. biomarkerów cyfrowych i metod analizy danych fizjologicznych [47] i obrazowych [24].

W diagnostyce obrazowej układu pokarmowego przyszłość leży raczej w rozwoju technik funkcjonalnych i ilościowych w tomografii rezonansu magnetycznego niż na przykład w rutynowym zastosowaniu tomografii mikrofalowej. Coraz większy nacisk kładzie się na metody pozwalające mierzyć procesy dynamiczne, takie jak motoryka jelit, dystrybucja płynów czy zmiany objętościowe w czasie. Badania nad funkcjonalnym obrazowaniem przewodu pokarmowego wskazują, że MRI może stopniowo rozszerzać swoje znaczenie z narzędzia oceniającego strukturę układu na metodę oceny jego funkcji [22], [23]. Co do przyszłości tomografii mikrofalowej szanse na jej szerokie zastosowanie należy szacować ostrożnie ze względu na ograniczenia wynikające z bardziej ogólnych rozważań dotyczących teorii obrazowania. Rozdzielczość metod obrazowych jest rzędu stosowanej długości fali, a rozdzielczość na poziomie długości mikrofal nigdy nie będzie satysfakcjonująca. Nadzieję można upatrywać w rozwiązaniach zbliżonych do tych, które znane są z medycyny nuklearnej, gdzie funkcjonalne obrazy pochodzące z metod o niskiej rozdzielczości (pozytonowa tomografia emisyjna lub tomografia emisyjna pojedynczych fotonów) poddaje się fuzji z obrazami pozyskiwanymi metodami wysokiej rozdzielczości (tomografia komputerowa i tomografia rezonansu jądrowego).

W zakresie dietetyki przyszłe zastosowania niejonizującego PEM będą koncentrować się prawdopodobnie na lepszym monitorowaniu odpowiedzi organizmu na interwencje żywieniowe. Integracja danych bioimpedancyjnych, informacji o nawodnieniu i składu ciała z danymi klinicznymi może umożliwić bardziej precyzyjne dostosowywanie zaleceń dietetycznych do indywidualnych potrzeb pacjentów [9], [10]. Kluczowe znaczenie będzie miał jednak postęp w analizie pozyskiwanych danych, a nie jakościowa zmiana w sensie zastosowania nowych technologii wykorzystujących pola elektromagnetyczne.

Wraz z rozwojem technologii należy wciąż podkreślać konieczność konsekwentnego utrzymania rygorystycznej oceny ryzyka i aktualizacji zaleceń związanych z bezpieczeństwem ich stosowania. Powinno się to opierać o solidne i wiarygodne badania naukowe [11], [13]. Dotyczy to w szczególności zastosowań klinicznych, w których PEM oddziałuje bezpośrednio z organizmem pacjenta.

13. Podsumowanie

Niejonizujące pole elektromagnetyczne, obejmujące m.in. fale radiowe i ich podzakres, czyli mikrofałe, stanowi jeden z lepiej poznanych fizycznych czynników środowiskowych wykorzystywanych we współczesnej medycynie. Jak pokazano w niniejszym opracowaniu, jego oddziaływanie z materią biologiczną ma charakter ściśle fizyczny, przewidywalny i możliwy do ilościowego opisu. Fundamentalną cechą fal radiowych jest zbyt niska energia pojedynczych fotonów, by mogły one bezpośrednio inicjować zmiany chemiczne w tkankach żywego organizmu. Stanowi to podstawę ich bezpiecznego stosowania w diagnostyce i terapii, o ile zachowane zostaną odpowiednie parametry ekspozycji.

Układ pokarmowy, ze względu na swoją złożoną budowę, wysoką zawartość wody oraz dynamicznie zmieniające się właściwości elektryczne i dielektryczne, stanowi interesujący

obiekt badań z punktu widzenia zastosowań fal radiowych. Pomiar tej zmienności mogą być wyzwaniem, ale są również bogatym źródłem informacji diagnostycznej, pozyskiwanej m.in. w metodach bioimpedancyjnych, tomografii mikrofalowej, czy w systemach telemetrycznych monitorujących funkcję przewodu pokarmowego. Zastosowania te mają jednak wciąż w dużej mierze charakter uzupełniający i wymagają dalszych badań.

Szczególne miejsce wśród technologii opartych na falach radiowych zajmuje tomografia rezonansu magnetycznego. Jest obecnie najbardziej zaawansowaną diagnostyczną metodą obrazowania w medycynie, która stanowi modelowy przykład racjonalnego, bezpiecznego i klinicznie ugruntowanego wykorzystania niejonizującego PEM. MRI pokazuje, że głębokie zrozumienie mechanizmów fizycznych, w połączeniu z rygorystycznymi limitami bezpieczeństwa, pozwala na uzyskanie wysokiej jakości informacji diagnostycznej bez narażania pacjenta na zbędne ryzyko.

W kontekście terapii podkreślono, że oddziaływanie fal radiowych na tkanki biologiczne zachodzi głównie poprzez mechanizmy termiczne. Metody takie jak hipertermia, diatermia czy ablacja mikrofalowa znajdują liczne zastosowania kliniczne, obecnie głównie w onkologii. Jednocześnie zaznaczono, że możliwości terapeutyczne w obrębie układu pokarmowego są na obecnym etapie ograniczone przez jego geometrię i zmienność fizjologiczną, natomiast doniesienia naukowe sugerują postęp również w tej dziedzinie.

Większość alarmistycznych doniesień dotyczących innych, poza termicznymi, rzekomych mechanizmów działania pól elektromagnetycznych, nie znajduje potwierdzenia w spójnych danych eksperymentalnych. Trzeba jednak uczciwie przyznać, że analiza zagadnień związanych z mikrobiomem jelitowym, metabolizmem oraz insulinoopornością pokazuje, że interpretacja potencjalnych efektów biologicznych ekspozycji na pole elektromagnetyczne wymaga szczególnej ostrożności. Dostępne badania charakteryzują się dużą rozbieżnością co do jednoznacznego określenia korzyści i zagrożeń związanych z wpływem niejonizującego PEM, ale równocześnie obarczone są istotnymi ograniczeniami metodologicznymi. Bardzo często wyniki uzyskiwane w modelach eksperymentalnych nie mogą być bezpośrednio ekstrapolowane na warunki fizjologiczne organizmu człowieka. W tym kontekście kluczowe pozostaje wyraźne rozróżnienie pomiędzy medycyną opartą na dowodach a narracjami pseudonaukowymi.

Należy pamiętać, że fale radiowe i mikrofałe nie stanowią uniwersalnego narzędzia terapeutycznego ani czynnika modulującego procesy biologiczne w sposób selektywny. Są natomiast bezpiecznym narzędziem diagnostycznym, a często również pomocniczym czynnikiem terapeutycznym, którego skuteczność i bezpieczeństwo wynikają z przestrzegania zasad fizyki i regulacji ekspozycji. Wytyczne związane z bezpiecznym stosowaniem tego czynnika fizycznego są efektem krytycznej analizy danych naukowych. Właściwe rozumienie ich oddziaływania ma znaczenie dla praktyki klinicznej, ale też dla racjonalnego podejścia do zagadnień żywienia, zdrowia publicznego i technologii medycznych.

14. Bibliografia

- [1] K. R. Foster, "Thermal and Nonthermal Mechanisms of Interaction of Radio-Frequency Energy with Biological Systems," 2000.
- [2] K. R. Foster and R. Glaser, "THERMAL MECHANISMS OF INTERACTION OF RADIOFREQUENCY ENERGY WITH BIOLOGICAL SYSTEMS WITH RELEVANCE TO EXPOSURE GUIDELINES," 2007.
- [3] G. Ziegelberger *et al.*, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," May 01, 2020, *Lippincott Williams and Wilkins*. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [4] B. Pophof, B. Henschenmacher, D. R. Kattinig, J. Kuhne, A. Vian, and G. Ziegelberger, "Biological Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields above 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report," Jan. 01, 2023, *Lippincott Williams and Wilkins*. doi: 10.1097/HP.0000000000001625.
- [5] "Dietetyka – Encyklopedia PWN: źródło wiarygodnej i rzetelnej wiedzy." Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/dietetyka;3892631.html>
- [6] "Dietetyka – Wikipedia, wolna encyklopedia." Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Dietetyka>
- [7] "Pokarmowy układ - Encyklopedia PWN: źródło wiarygodnej i rzetelnej wiedzy." Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/pokarmowy-uklad;3959178.html>
- [8] C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey," 1996.
- [9] S. Grimnes and Ø. G. Martinsen, "Bioimpedance and Bioelectricity Basics: Third Edition," *Bioimpedance and Bioelectricity Basics: Third Edition*, pp. 1–563, Jan. 2014.
- [10] U. G. Kyle *et al.*, "Bioelectrical impedance analysis - Part I: Review of principles and methods," *Clinical Nutrition*, vol. 23, no. 5, pp. 1226–1243, 2004, doi: 10.1016/j.clnu.2004.06.004.
- [11] World Health Organization., "Radiation and health." Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/emf>
- [12] S. J. Ling, William. Moebis, and Jeff. Sanny, "Fizyka Dla Szkół Wyzszych, Tom 2," 2018, Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://openstax.pl/szczegoly-ksiazki>

- [13] G. Ziegelberger *et al.*, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz),” May 01, 2020, *Lippincott Williams and Wilkins*. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [14] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans, “IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 102: Non-Ionizing Radiation, Part 2 : Radiofrequency Electromagnetic Fields,” 2013.
- [15] S. Semenov, “Microwave tomography: Review of the progress towards clinical applications,” Aug. 13, 2009, *Royal Society*. doi: 10.1098/rsta.2009.0092.
- [16] R. Scapatucci, V. Lopresto, R. Pinto, M. Cavagnaro, and L. Crocco, “Monitoring thermal ablation via microwave tomography: An ex vivo experimental assessment,” *Diagnostics*, vol. 8, no. 4, Dec. 2018, doi: 10.3390/diagnostics8040081.
- [17] P. M. Meaney, M. W. Fanning, D. Li, S. P. Poplack, and K. D. Paulsen, “A clinical prototype for active microwave imaging of the breast,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 48, no. 1 PART 1, pp. 1841–1853, 2000, doi: 10.1109/22.883861.
- [18] A. Modiri, S. Goudreau, A. Rahimi, and K. Kiasaleh, “Review of breast screening: Toward clinical realization of microwave imaging: Toward,” Dec. 01, 2017, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/mp.12611.
- [19] G. Ciuti, A. Menciassi, and P. Dario, “Capsule endoscopy: From current achievements to open challenges,” *IEEE Rev Biomed Eng*, vol. 4, pp. 59–72, 2011, doi: 10.1109/RBME.2011.2171182.
- [20] R. W. Brown, Y. C. N. Cheng, E. M. Haacke, M. R. Thompson, and R. Venkatesan, “Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design: Second Edition,” *Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design: Second Edition*, vol. 9780471720850, pp. 1–944, Jun. 2014, doi: 10.1002/9781118633953.
- [21] C. Westbrook and J. Talbot, “MRI in practice,” p. 395, 2019, Accessed: Dec. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/MRI+in+Practice%2C+5th+Edition-p-9781119391968>
- [22] C. Hoad, C. Clarke, L. Marciani, M. J. Graves, and M. Corsetti, “Will MRi of gastrointestinal function parallel the clinical success of cine cardiac MRI?,” vol 92, p. 20180433, 2019, doi.org/10.1259/bjr.20180433
- [23] A. Khalaf, “Magnetic resonance imaging biomarkers of gastrointestinal motor function and fluid distribution,” *World J Gastrointest Pathophysiol*, vol. 6, no. 4, p. 140, 2015, doi: 10.4291/wjgp.v6.i4.140.

- [24] J. Liu *et al.*, “Deep Learning for Differentiating Benign From Malignant Bile Duct Dilation on MRCP: Development and Prospective Evaluation of an Xception-Logistic Regression Ensemble Model,” *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, vol. 0, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1002/JMRI.70200.
- [25] J. van der Zee, “Heating the patient: A promising approach?,” Aug. 2002. doi: 10.1093/annonc/mdf280.
- [26] H. P. Kok *et al.*, “Heating technology for malignant tumors: a review,” Jan. 01, 2020, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/02656736.2020.1779357.
- [27] M. H. Falk and R. D. Issels, “Hyperthermia in oncology.,” *International Journal of Hyperthermia*, vol. 17, no. 1, pp. 1–18, 2001, doi: 10.1080/02656730150201552.
- [28] C. Brace, “Thermal tumor ablation in clinical use,” *IEEE Pulse*, vol. 2, no. 5, pp. 28–38, Sep. 2011, doi: 10.1109/MPUL.2011.942603.
- [29] M. G. Keane, K. Bramis, S. P. Pereira, and G. K. Fusai, “Systematic review of novel ablative methods in locally advanced pancreatic cancer,” *World J Gastroenterol*, vol. 20, no. 9, pp. 2267–2278, 2014, doi: 10.3748/WJG.V20.I9.2267.
- [30] G. Yang *et al.*, “The efficacy of microwave ablation versus liver resection in the treatment of hepatocellular carcinoma and liver metastases: A systematic review and meta-analysis,” May 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijso.2020.03.006.
- [31] J. Pollet, G. Ranica, P. Pedersini, S. G. Lazzarini, S. Pancera, and R. Buraschi, “The Efficacy of Electromagnetic Diathermy for the Treatment of Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review with Meta-Analysis,” Jun. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/jcm12123956.
- [32] T. Saliev, D. Begimbetova, A. R. Masoud, and B. Matkarimov, “Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin,” Jan. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.009.
- [33] F. Dehaghi, V. V. Shekarloo, and M. Golbaghi, “The Impact of Electromagnetic Field Exposure on Diabetes: A Narrative Review,” *J Environ Health Sustain Dev*, vol. 9, no. 4, pp. 2390–404, 2024, doi: 10.18502/jehsd.v9i4.17386.
- [34] M. Havas, “Dirty Electricity Elevates Blood Sugar Among Electrically Sensitive Diabetics and May Explain Brittle Diabetes,” *Electromagn Biol Med*, vol. 27, pp. 135–146, 2008, doi: 10.1080/15368370802072075.
- [35] J. F. László, J. Szilvási, A. Fényi, A. Szalai, K. Gyires, and R. Pórszász, “Daily exposure to inhomogeneous static magnetic field significantly reduces blood glucose level in diabetic mice,” *Int J Radiat Biol*, vol. 87, no. 1, pp. 36–45, Jan. 2011, doi: 10.3109/09553002.2010.518200.

- [36] M. Nowacka-Kłos, K. Studzińska, A. Drozd, R. Hansdorfer-Korzon, A. Korzon-Burakowska, and E. Orłowska-Kunikowska, "PRACA POGLĄDOWA Możliwości kompleksowej fizjoterapii w profilaktyce i leczeniu chorych na cukrzycę Comprehensive scope of physiotherapy in the prevention and treatment of patients with diabetes," vol. 7, pp. 104–113, 2012, [Online]. Available: www.dk.viamedica.pl
- [37] Y. Wang *et al.*, "Enhanced Effects of Intermittent Fasting by Magnetic Fields in Severe Diabetes," *Research*, vol. 7, Jan. 2024, doi: 10.34133/RESEARCH.0468/SUPPL_FILE/RESEARCH.0468.F1.PDF.
- [38] A. Masoumi, N. Karbalaeei, S. M. J. Mortazavi, and M. Shabani, "Radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi (2.4 GHz) causes impaired insulin secretion and increased oxidative stress in rat pancreatic islets," *Int J Radiat Biol*, vol. 94, no. 9, pp. 850–857, Sep. 2018, doi: 10.1080/09553002.2018.1490039.
- [39] I. Y. Koç *et al.*, "Investigating the effect of radiofrequency electromagnetic field exposure on molecular pathways related to insulin resistance and adipogenesis in zebrafish embryos - A pilot study without quantitative exposure metrics," *Science of the Total Environment*, vol. 954, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176038.
- [40] S. A. Meo, Y. Alsubaie, Z. Almubarak, H. Almutawa, Y. Alqasem, and R. M. Hasanato, "Association of Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Field Radiation (RF-EMFR) Generated by Mobile Phone Base Stations with Glycated Hemoglobin (HbA1c) and Risk of Type 2 Diabetes Mellitus," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 12, no. 11, pp. 14519–14528, Nov. 2015, doi: 10.3390/IJERPH121114519.
- [41] K. Kalantar-Zadeh, N. Ha, J. Z. Ou, and K. J. Berean, "Ingestible Sensors," Apr. 28, 2017, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acssensors.7b00045.
- [42] M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, and A. K. Datta, "Engineering Properties of Foods: Third Edition," *Engineering Properties of Foods: Third Edition*, pp. 1–739, Jan. 2014, doi: 10.1201/9781420028805/ENGINEERING-PROPERTIES-FOODS-SYED-RIZVI-ASHIM-DATTA-RAO/RIGHTS-AND-PERMISSIONS.
- [43] B. K. Simpson, "Food Biochemistry and Food Processing Second Edition i," 2012.
- [44] H. Jiang, Z. Liu, and S. Wang, "Microwave processing: Effects and impacts on food components," Sep. 22, 2018, *Taylor and Francis Inc*. doi: 10.1080/10408398.2017.1319322.
- [45] A. M. Kalla and D. R., "Microwave energy and its application in food industry: A reveiw," *Asian Journal of Dairy and Food Research*, no. OF, Feb. 2017, doi: 10.18805/AJDFR.V0IOF.7303.

- [46] "Microwave Ovens | FDA." Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/resources-you-radiation-emitting-products/microwave-ovens?utm_source=chatgpt.com
- [47] S. Park, T. J. Ge, D. D. Won, J. K. Lee, and J. C. Liao, "Digital biomarkers in human excreta," Aug. 01, 2021, *Nature Research*. doi: 10.1038/s41575-021-00462-0.