

---

ODDZIAŁYWANIE ELEKTROMAGNETYCZNYCH  
FAL MILIMETROWYCH NA ZDROWIE  
PRACOWNIKÓW PROJEKTOWANYCH SIECI 5G  
I POPULACJI GENERALNEJ



**NPZ**

NARODOWY PROGRAM ZDROWIA

ZADANIE Z ZAKRESU ZDROWIA PUBLICZNEGO REALIZOWANE W RAMACH NARODOWEGO PROGRAMU ZDROWIA NA LATA 2016-2020 PN.  
„EKSPERTYZA DOTYCZĄCA POTENCJALNYCH EFEKTÓW BIOLOGICZNYCH DZIAŁANIA ELEKTROMAGNETYCZNYCH FAL MILIMETROWYCH  
(EFM) EMITOWANYCH PRZEZ URZĄDZENIA SYSTEMU 5G NA ORGANIZM CZŁOWIEKA” W ZAKRESIE CELU OPERACYJNEGO NR 4, PUNKTU  
3.1H; UMOWA NR: 6/4/11/NPZ/FRPH/2018/312/546

**DYREKTOR**

*prof. dr hab. med. Konrad Rydzynski*

Przygotował zespół pod redakcją prof. dr. hab. med. Konrada Rydzyńskiego  
(Instytut Medycyny Pracy w Łodzi):

dr hab. inż. Paweł Bieńkowski, prof. PWr (Politechnika Wrocławska)

prof. dr hab. Alicja Bortkiewicz (Instytut Medycyny Pracy w Łodzi)

dr inż. Jolanta Karpowicz (Centralny Instytut Ochrony Pracy – PIB, Warszawa)

płk. dr inż. Jarosław Kieliszek (Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, Warszawa)

dr Piotr Politański (Instytut Medycyny Pracy w Łodzi)

dr hab. inż. Kamil Staniec, prof. PWr (Politechnika Wrocławska)

prof. dr hab. Marek Zmyślony (Instytut Medycyny Pracy w Łodzi)

Wykaz skrótów użytych w Raporcie:

- 3GPP - partnerstwo na rzecz rozwoju łączności bezprzewodowej (3rd Generation Partnership Project)
- 5G - 5. generacja systemów bezprzewodowych (*5th generation*)
- ALARA - tak mało, jak można racjonalnie osiągnąć (*As Low As Reasonably Achievable*)
- BW - szerokość kanału (*Bandwidth*)
- CEPT - Europejska Konferencja Administracji Poczty i Telekomunikacji (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations)
- DL - łącze „w dół”, tj. od stacji bazowej do terminala (*Downlink*)
- EFM - elektromagnetyczne fale milimetrowe (w niniejszym Raporcie z zakresu 15–100 GHz)
- EHF - częstotliwości ekstremalnie wysokie (*Extremely High Frequency*)
- EIRP - zastępcza moc promieniowana izotropowo (*Equivalent Isotropic Radiated Power*)
- eMBB - ulepszona mobilna komunikacja szerokopasmowa (*enhanced Mobile Broadband*)
- FCC - Federalna Komisja Telekomunikacyjna (Federal Communications Commission)
- FPP - łącze stałe typu „punkt-punkt” (*Fixed Point-Point*)
- FR1(2) - zakresy częstotliwości przeznaczone dla systemów 5G (*Frequency Range*)
- gNB - stacje bazowe systemów 5G (*Next Generation Node-B*)
- GPO - Graniczne Poziomy Oddziaływania
- GSM - standard systemu komórkowego 2. generacji (*Global System for Mobile Communications*)
- HPBW - kąt połowy mocy (*Half-Power BeamWidth*), stosuje się również nazwę kąt „-3 dB”
- Hsp - białka szoku cieplnego (*Heat Shock Proteins*)
- IARC - Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer)
- ICNIRP - Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
- IEC - Międzynarodowa Komisja Techniczna (International Electrotechnical Commission)
- IEEE - Instytut Inżynierii Elektrycznej i Elektroniki (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- IM - margines implementacyjny (*Implementation Margin*)
- InH - hotspot wewnętrzzbudynkowy (*Indoor Hotspot*)
- IPN- - Interwencyjne Poziomy Narażenia

ISM	- „przemysłowe, naukowe, medyczne" ( <i>Industrial, Scientific, Medical</i> )
ITU	- Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna ( <i>International Telecommunication Union</i> )
LOS	- widoczność bezpośrednia, nieprzesłonięta ( <i>Line Of Sight</i> )
LTE	- standard systemu komórkowego 4. generacji ( <i>Long-Term Evolution</i> )
MF	- średnie pasma częstotliwości 5G: 1–6 GHz ( <i>Medium Frequency</i> )
MIMO	- antenowe zwielokrotnienie nadawczo-odbiorcze ( <i>Multiple Input Multiple Output</i> )
mMTC	- komunikacja typu maszynowego ( <i>massive Machine-Type Communications</i> )
NF	- współczynnik szumowy ( <i>Noise Factor</i> )
NLOS	- widoczność przesłonięta ( <i>Non-Line Of Sight</i> )
PEM	- pole elektromagnetyczne
SAR	- szybkość pochłaniania właściwego energii ( <i>Specific Absorption Rate</i> )
SCENIHR-	Komitet Naukowy ds. Pojawiających się i Nowo Rozpoznanych Zagrożeń dla Zdrowia ( <i>Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks</i> )
SHF	- częstotliwości super-wysokie (3–30 GHz)( <i>Super High Frequency</i> )
SNR	- stosunek mocy sygnału do szumu ( <i>Signal-to-Noise Ratio</i> )
TS	- stacja przenośna ( <i>Transportable Station</i> )
UDN	- sieć ultra-gęsta ( <i>Ultra Dense Network</i> )
UE	- Unia Europejska
UL	- łącze „w górę”, tj. od terminala do stacji bazowej ( <i>Uplink</i> )
UMa	- makrokomórka ( <i>Urban Macrocell</i> )
UMi	- mikrokomórka ( <i>Urban Microcell</i> )
UMTS	- standard systemu komórkowego 3. generacji ( <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> )
URLLC	- komunikacja krytyczna ( <i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i> )
UT	- terminal użytkownika ( <i>User Terminal</i> )
WHO	- Światowa Organizacja Zdrowia ( <i>World Health Organization</i> )
WRC	- Światowa Konferencja Radiokomunikacyjna ( <i>World Radio Conference</i> )

## SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie .....	7
2. Elektromagnetyczne promieniowanie mikrofalowe.....	9
2.1. Charakterystyka fizyczna fali elektromagnetycznej .....	9
2.2. Propagacja fal elektromagnetycznych różnych zakresów częstotliwości .....	11
2.2.1. Propagacja mikrofal .....	13
2.3. Identyfikacja źródeł promieniowania mikrofalowego (ze szczególnym uwzględnieniem EFM).....	14
2.4. Ocena wielkości ekspozycji przy urządzeniach systemu 5G.....	18
2.4.1. Założenia funkcjonalne dla systemów 5G.....	18
2.4.2. Pasma częstotliwości przeznaczone do zastosowania w systemach 5G .....	21
2.4.3. Źródła promieniowania fal milimetrowych w systemach 5G, propagacja, moc sygnału elektromagnetycznego docierającego do użytkownika .....	23
2.4.4. PEM w środowisku od stacji bazowych systemów 5G.....	31
3. Efekty biologiczne działania EFM i mechanizmy tego działania .....	36
3.1. Mechanizmy oddziaływania EFM.....	36
3.1.1. Wprowadzenie.....	38
3.1.2. Nagrzewanie tkanek .....	39
3.1.3. Inne mechanizmy oddziaływania EFM.....	42
3.2. Skutki biologiczne i zdrowotne .....	45
3.2.1. Działanie EFM na skórę .....	46
3.2.2. Działanie EFM na oczy.....	48
3.2.3. Inne, nietermiczne skutki działania EFM.....	49
3.2.4. Lecznicze zastosowanie EFM.....	58
4. Zasady ochrony przed elektromagnetycznymi zagrożeniami bezpieczeństwa i zdrowia .....	63
4.1. Rozwój systemu ochrony przed elektromagnetycznymi zagrożeniami bezpieczeństwa i zdrowia ludzi .....	63

4.1.1. Ochrona pracowników: zakres ochrony wymagany przez Dyrektywę 2013/35/UE.....	63
4.1.2. Ochrona ludności: zakres ochrony sugerowany przez Zalecenie 1999/519/WE .....	70
4.1.3. Wymagania dotyczące szczególnej ochrony użytkowników implantów medycznych przed zagrożeniami elektromagnetycznymi .....	72
4.2. Wytyczne ICNIRP – cel i znaczenie praktyczne .....	75
4.2.1. Formalny status wytycznych ICNIRP.....	75
4.2.2. Miary zagrożeń elektromagnetycznych w wytycznych ICNIRP .....	78
4.2.3. Zagrożenia elektromagnetyczne uwzględnione w systemie limitów ICNIRP .....	83
5. Ocena wartości polskich limitów ekspozycji zawodowej i środowiskowej na PEM emitowane przez urządzenia systemu 5G na tle przepisów europejskich.....	85
6. Podsumowanie .....	91
7. Piśmiennictwo.....	95

## 1. WPROWADZENIE

W przyjętej przez rząd Rzeczypospolitej Polskiej w 2017 r. Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.) czytamy:

Zgodnie z celami przyjętej w 2010 r. Europejskiej Agendy Cyfrowej Polska zobowiązała się do 2020 r. zapewnić wszystkim obywatelom dostęp do internetu o prędkości co najmniej 30 Mb/s oraz doprowadzić do wykorzystania usług dostępu o prędkości co najmniej 100 Mb/s przez 50% gospodarstw domowych. Należy także wskazać nowe europejskie cele w zakresie łączności z datą realizacji do 2025 r., które będą ujęte w aktualizowanym w 2017 r. Narodowym Planie Szerokopasmowym:

1. Gigabitowy dostęp do internetu dla wszystkich miejsc stanowiących główną siłę napędową rozwoju społeczno-gospodarczego, takich jak szkoły, węzły transportowe i główne miejsca świadczenia usług publicznych, a także dla przedsiębiorstw prowadzących intensywną działalność w internecie.
2. Wszystkie obszary miejskie i główne szlaki komunikacyjne mają mieć „niezakłócony” dostęp do sieci 5G.
3. Wszystkie gospodarstwa domowe mają mieć dostęp do internetu o prędkości łącza „w dół” (tj. pobierania) wynoszącej co najmniej 100 Mbps, z możliwością jej zwiększenia do prędkości mierzonej w gigabitach.
4. Dodatkowo w 2020 r. przynajmniej jedno miasto w każdym kraju UE ma mieć w pełni rozwiniętą usługę komercyjną łączności 5G.

W celu realizacji tych wytycznych Ministerstwo Cyfryzacji przygotowało w 2018 r. projekt dokumentu pt. „Strategie 5G dla Polski”, przewidujący wykorzystanie dla systemów 5G pasm 700 MHz, 3,4–3,8 GHz i 26 GHz. Ze względu na właściwości elektromagnetycznych fal milimetrowych (EFM) (w tym 26 GHz), m.in. bardzo szybkiego pochłaniania ich przez powietrze i obiekty znajdujące się na drodze propagacji, anteny je emitujące muszą znajdować się nie rzadziej niż co 200–250 m (na terenach o zapotrzebowaniu na bardzo wysoką przepustowość przesyłanych danych mogą to być nawet wielokrotnie mniejsze odległości, rzędu kilkudziesięciu metrów). Serwisowanie tak wielkiej liczby urządzeń nadawczych spowoduje znaczny wzrost liczebności grupy pracowników ekspozowanych na pole elektromagnetyczne (PEM), w tym na dotychczas słabo – pod względem działania biologicznego – rozpoznane EFM. Bardzo istotnym ze społecznego punktu widzenia aspektem tego problemu jest także potencjalny wzrost ekspozycji populacji ogólnej zamieszkującej tereny objęte zasięgiem sieci 5G na EFM. Naszym zdaniem oczywistą sprawą jest, że pojawienie się ogromnej liczby nowych urządzeń nadawczych związanych

z systemem 5G zwiększy niepokój znacznej części społeczeństwa, która już obecnie wyraża obawy przed potencjalnie negatywnym wpływem PEM na zdrowie. Są one podsycane przez zdecydowanych przeciwników telefonii komórkowej, którzy publikują w internecie alarmistyczne, niesprawdzone dane o „zabójczym” dla człowieka działaniu PEM. Skutecznym sposobem łagodzenia tych nastrojów może być upowszechnienie – przed wdrożeniem systemu 5G do powszechnego stosowania – rzetelnego przeglądu literatury w języku polskim, dotyczącego potencjalnych skutków zdrowotnych oddziaływania PEM o częstotliwościach stosowanych w tym systemie. W 2016 r. ukazała się analiza pt. „Aspekty medyczne i biofizyczne promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej” obejmująca efekty działania PEM z zakresu 500–5000 MHz (a więc znacznej części zakresu PEM przewidzianych do wykorzystania w systemie 5G), przygotowany przez Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego.

W niniejszym Raporcie dokonaliśmy przeglądu istniejących danych na temat biologicznego działania EFM (w tym 15–100 GHz), czyli PEM dotąd niewykorzystywanego w powszechnie użytkowanych urządzeniach telefonii komórkowej. Przegląd ten ma dostarczyć rzetelnych danych naukowych na temat możliwych negatywnych skutków zdrowotnych oddziaływania PEM jeszcze na etapie prac nad wprowadzeniem systemu 5G. Raport jest uzupełniony analizą przewidywanych wielkości ekspozycji na EFM emitowanych przez anteny systemu 5G. Należy podkreślić, że w literaturze polskiej nie istnieje obecnie taki przegląd. Analizy zagraniczne z kolei bardzo szybko stają się nieaktualne wobec gwałtownego rozwoju badań naukowych nad różnorodnymi konsekwencjami oddziaływania projektowanych sieci 5G na ludzi. Badania te dotyczą skutków mogących towarzyszyć projektowaniu różnych rozwiązań technicznych terminali 5G i współpracującej z nimi infrastruktury oraz zasad oceny zagrożeń elektromagnetycznych, jakie są z nimi nierozzerwalnie związane. Uważamy, że powinien zostać powołany komitet naukowy, który na bieżąco (raz na 1–2 lata) sporządzałby przegląd pojawiających się w tym okresie badań naukowych z zakresu oddziaływania EFM.

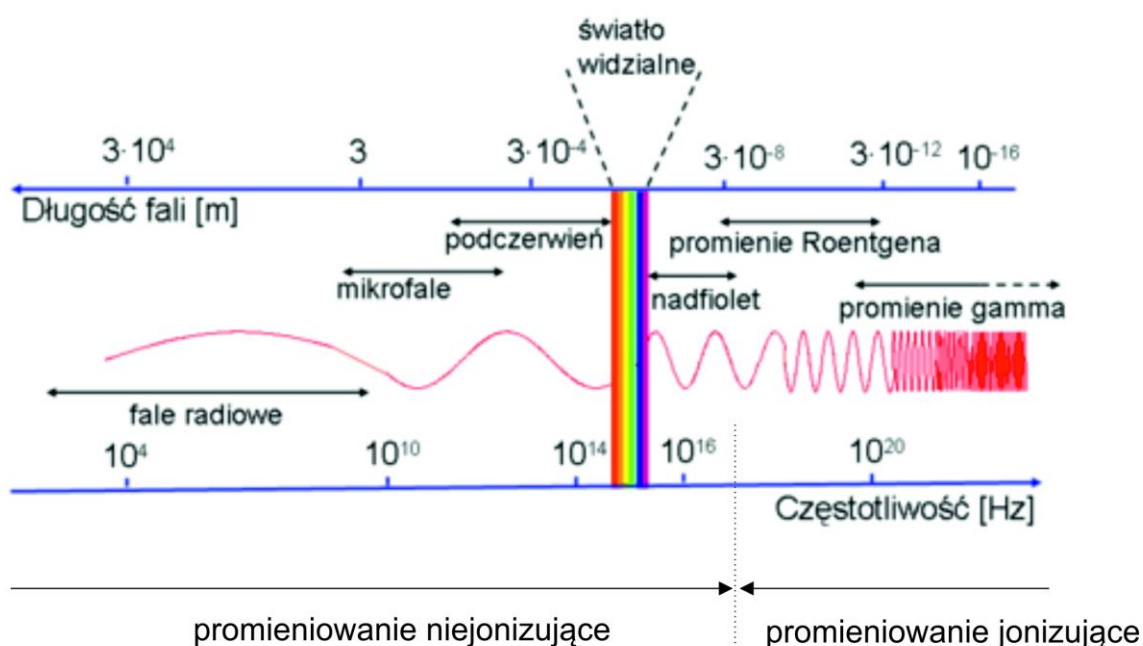
W związku z krytyką polskich przepisów dotyczących ochrony przed PEM, a zwłaszcza poziomów dopuszczalnych pól elektromagnetycznych w środowisku, znaczną część Raportu poświęciliśmy analizie zarówno przepisów polskich, jak i zaleceń unijnych. Sprawdzając, czy obowiązujące obecnie przepisy polskie stanowią rzeczywiste zagrożenie dla pełnego wdrożenia systemu 5G, porównaliśmy z nimi mierzone w środowisku wartości PEM emitowanych przez anteny stacji bazowych. Wszystkie nasze analizy zmierzały do przedstawienia wniosków dotyczących ewentualnej weryfikacji przepisów przy zachowaniu odpowiedniej ochrony zdrowia osób narażonych.



## 2. ELEKTROMAGNETYCZNE PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE

### 2.1. CHARAKTERYSTYKA FIZYCZNA FALI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie PEM, nazywane inaczej promieniowaniem elektromagnetycznym. Istnieją różne rodzaje fal elektromagnetycznych, które nas otaczają, choć tylko niektóre z nich są przez nas dostrzegalne – jednym z rodzajów promieniowania elektromagnetycznego jest światło widzialne. Widmo fal elektromagnetycznych przedstawia rysunek 2.1.1.



Ryc. 2.1.1. Widmo fal elektromagnetycznych

Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi, tzn. w każdym punkcie PEM wektor natężenia pola elektrycznego  $E$  i wektor natężenia pola magnetycznego  $H$  są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali elektromagnetycznej i do siebie wzajemnie, a prędkość ich rozchodzenia się w próżni wynosi  $c = 3 \times 10^8$  m/s i odpowiada prędkości rozchodzenia się światła [Bem, 1973].

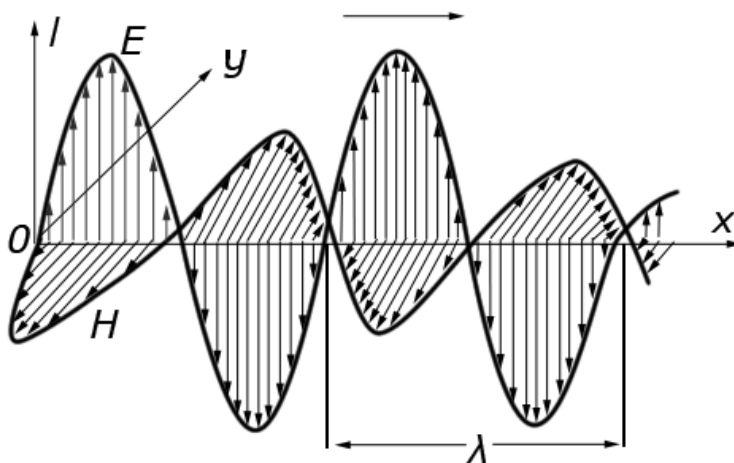
Wielkościami charakteryzującymi falę elektromagnetyczną są:

- wektor natężenia pola elektrycznego  $E$  wyrażany w woltach na metr [V/m],
- wektor natężenia pola magnetycznego wyrażany w amperach na metr [A/m],
- częstotliwość wyrażana w hercach [Hz],
- długość fali wyrażana w metrach, centymetrach lub milimetrach [m, cm, mm].

Pomiędzy częstotliwością i długością fali elektromagnetycznej istnieje stała zależność – im większa częstotliwość fali, tym mniejsza jest jej długość [Kubacki, 2009]. Zależność tę wyraża wzór:

$$\lambda = c/f \quad (2.1.1)$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali,  $c$  – prędkość fali,  $f$  – częstotliwość.



Ryc. 2.1.2. Pole elektryczne i magnetyczne płaskiej fali elektromagnetycznej o długości  $\lambda$

Własności, warunki powstawania i rozprzestrzeniania się fali elektromagnetycznej opisują w zupełności równania falowe wynikające z równań Maxwella. Z pierwszego równania wnioskujemy, że zmienne pole elektryczne wytwarza wirowe pole magnetyczne – z drugiego, że zmienne pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne (pole wirowe charakteryzuje się tym, że linie tego pola są krzywymi zamkniętymi). Maxwell wykazał swoimi równaniami, że PEM może się rozchodzić w przestrzeni z prędkością światła – nazywamy je falą elektromagnetyczną.

Ośrodek, w którym rozchodzi się fala elektromagnetyczna, ma istotny wpływ na takie jej własności jak prędkość rozchodzenia się, polaryzacja oraz natężenie. Prędkość fali elektromagnetycznej osiąga najwyższą wartość w próżni. W ośrodkach materialnych jest ona zawsze mniejsza, a do tego część niesionej przez falę energii ulega pochłonięciu przez obiekt. Fala traci wówczas część energii, która zostaje zamieniona na energię wewnętrzną obiektu. Fizyka określa to zjawisko jako absorpcję. W realnych ośrodkach występuje również zjawisko dyspersji fali elektromagnetycznej, tzn. uzależnienie prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej od jej częstotliwości [Charytoniuk, 1993].

W niektórych zjawiskach fizycznych ujawniają się właściwości falowe, a w niektórych właściwości korpuskularne, czyli cząsteczkowe, fali elektromagnetycznej. Fale o niskiej częstotliwości wykazują silniej właściwości falowe, natomiast fale wysokich częstotliwości – właściwości korpuskularne.

Nazwy poszczególnych fal elektromagnetycznych są tradycyjne i wynikają na ogół ze sposobów otrzymywania tych fal.

Fale radiowe to fale elektromagnetyczne o długości większej niż 0,1 mm. Ze względu na ich długość (czy też częstotliwość) rozróżnia się ich poszczególne typy. Fale radiowe powstają przez wypromieniowanie energii ze źródła najczęściej określanego jako „antena nadawcza”. Ze względu na środowisko rozchodzenia się fali elektromagnetycznej wyróżnia się falę przyziemną, troposferyczną, jonosferyczną i falę w przestrzeni kosmicznej. W zależności od długości fali radiowej na jej rozchodzenie się wpływają różnorodne zjawiska, np. dyfrakcja, refrakcja, odbicia od jonosfery itp. [Charytoniuk, 1993].

Mikrofale są to fale elektromagnetyczne o długości 0,1 mm–30 cm. Mogą być wytwarzane w elektronicznych układach drgających, podobnie jak fale radiowe, i dlatego dość często zalicza się je, bez wyszczególnienia, właśnie do fal radiowych. Obecnie istnieje wiele sposobów generacji mikrofal, np. przez lampy mikrofalowe – klitrony, magnetrony. Szybki rozwój elektroniki pozwala na tworzenie źródeł mikrofal z wykorzystaniem układów półprzewodnikowych.

Pierwotnie mikrofały wykorzystywane były w radiolokacji. Obecnie ich zastosowanie staje się coraz większe, w tym szczególnie w telekomunikacji [Szóstka, 2006].

## 2.2. PROPAGACJA FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH RÓŻNYCH ZAKRESÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych jest uwarunkowane wpływem ośrodków biorących udział w propagacji, wyjątkowo trudnym do analitycznego ujęcia w przypadku tych o znacznym stopniu niejednorodności. W eksploatacji systemów radiokomunikacyjnych istotne znaczenie ma określenie strat transmisji na trasie łączy, zniekształceń sygnałów propagujących w ośrodkach dyspersyjnych i zmiany kierunku propagacji fali elektromagnetycznej. Straty transmisji (tłumienie fali elektromagnetycznej) w szczególności zależą m.in. od geometrii łączy radiowych, wpływu ziemi i odbić terenowych.

Zniekształcenia sygnałów radiokomunikacyjnych są uwarunkowane dyspersją i wielokierunkowością rozchodzenia się fali elektromagnetycznej, natomiast zmiana kierunku wynika z niejednorodności ośrodków biorących udział w rozchodzeniu się fali. W praktyce najczęściej rozpatruje się specyfikę rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w konkretnym (lub hipotetycznym) łączy w celu określenia natężenia pola lub mocy na wejściu odbiornika w punkcie końcowym łączy i wpływu propagacji na niezawodność eksploatacji łączy radiokomunikacyjnego. W każdym konkretnym przypadku można, na podstawie złożonych danych, zbudować model

propagacji fali elektromagnetycznej w łączy radiokomunikacyjnym z wyodrębnieniem zasadniczych czynników wpływających na propagację [Charytoniuk, 1993].

Dla budowy modelu propagacji fali elektromagnetycznej istotna jest znajomość:

- propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku idealnym,
- sposobu określania parametrów elektrycznych ośrodka rzeczywistego, uczestniczącego w propagacji na danej trasie, i jego aproksymacja ośrodkami idealnymi,
- rodzajów fal elektromagnetycznych rozchodzących się w warunkach rzeczywistych,
- specyfiki rozchodzenia się różnych rodzajów fal elektromagnetycznych w warunkach rzeczywistych z uwzględnieniem wykorzystywanego zakresu częstotliwości.

Rozpatrując zagadnienie rozchodzenia się fali elektromagnetycznej poszczególnych zakresów częstotliwości, należy uwzględnić fakt, że klasyfikacja „dziesiętna” fal elektromagnetycznych stanowi podział umowny, zakładający wyraźne rozgraniczenie tych zakresów, które nie ma ścisłego uzasadnienia w przyrodzie. W rzeczywistości występują wyraźne prawidłowości w propagacji fali o wartościach środkowych danego zakresu częstotliwości. Natomiast w przypadku częstotliwości skrajnych specyfika ich propagacji jest zazwyczaj wspólna dla sąsiadujących zakresów. Zestawienie sposobów propagacji fali elektromagnetycznej różnych zakresów częstotliwości przedstawione jest w tabeli 2.2.1.

Tab. 2.2.1. Sposoby propagacji fali elektromagnetycznej różnych zakresów częstotliwości [Charytoniuk, 1993]

Zakresy	Rodzaje fali EM				
	przyziemna		troposferyczna	jonosferyczna	fala EM w wolnej przestrzeni
	powierzchniowa	przestrzenna			
metrowe	+	+	+	+	+
decymetrowy	-	+	+	-	+
centymetrowy	-	+	+	-	+
milimetrowy	-	+	-	-	+

### 2.2.1. PROPAGACJA MIKROFAL

Mikrofale obejmują szeroki zakres częstotliwości, dający wiele praktycznych możliwości. Fale metrowe i decymetrowe mają zastosowanie w radiokomunikacji, radionawigacji i radiolokacji. Fale centymetrowe są wykorzystywane przeważnie w radiolokacji i radiokomunikacji. Fale milimetrowe są również powszechnie stosowane w radiolokacji oraz coraz powszechniej w radiokomunikacji.

Wymienione zastosowania wynikają z możliwości fizycznych (w tym propagacyjnych) dostępnych w tych zakresach fal. Z drugiej strony wymagania stawiane przez tak różnorodnych użytkowników implikują wybór określonego sposobu propagacji fal elektromagnetycznych. W praktyce w zakresie mikrofal istnieją (w zależności od warunków) 2 rodzaje fal wymienione w klasyfikacji według sposobów propagacji, tzn. fale przyziemne przestrzenne i fale rozchodzące się w wolnej przestrzeni [Kubacki, 2009].

Podstawowe znaczenie praktyczne fal milimetrycznych ma propagacja bezpośrednia w granicach horyzontu.

Rodzaj rozchodzącej się fali elektromagnetycznej jest zależny od konfiguracji łącza i trajektorii fali w ośrodku propagacji, przy czym przez zapewnienie odpowiednich warunków wypromieniowania fali elektromagnetycznej preferuje się pożądany sposób jej rozchodzenia się. Warunki wypromieniowania fali elektromagnetycznej są bezpośrednio związane z charakterystykami kierunkowymi stosowanych anten i ich wysokościami zawieszenia. Duże zróżnicowanie w tym zakresie występuje zasadniczo w radiokomunikacji. W radiokomunikacji ruchomej wykorzystuje się przeważnie anteny o dookólnych charakterystykach kierunkowych, w kształcie zbliżonym do spłaszczonego toroidu. Są one umieszczone zazwyczaj na małej wysokości nad powierzchnią ziemi. W rezultacie bliskie otoczenie anteny, szczególnie w obrębie pierwszej strefy Fresnela, bierze udział w kształtowaniu jej charakterystyki kierunkowej, co przejawia się we wzroście ilości listków bocznych i kącie elewacji maksimum tych listków [Charytoniuk, 1993].

W zakresie fal milimetrycznych zasięg fali przyziemnej powierzchniowej jest bardzo mały, ponieważ dla tych częstotliwości powierzchniowe warstwy ziemi przedstawiają dielektryk stratny. Ten rodzaj propagacji fali elektromagnetycznej w zakresie mikrofal znajduje powszechne zastosowanie w radiokomunikacji wykorzystującej radiotelefony przenośne – w zależności od warunków propagacji fal uzyskuje się zasięgi od kilku do kilkunastu kilometrów. Tłumienność fali powierzchniowej jest zależna od częstotliwości i parametrów elektrycznych powierzchni ziemi, natomiast w mniejszym stopniu zależy od rzeczywistego zawieszenia anten.

Ogólnie nie jest możliwe dokładne uwzględnienie wpływu nierówności powierzchni ziemi oraz przeszkód naturalnych i sztucznych na propagację fal przyziemnych zakresu mikrofal. Obliczenie

natężenia pola i określenie jego fluktuacji wymaga w każdym konkretnym przypadku odtworzenia profilu trasy, określenia trajektorii fali elektromagnetycznej i przyjęcia właściwej metody analitycznej. Uwzględnia się takie przypadki szczególne, jak np. dyfrakcja na przeszkodzie pochłaniającej, rozproszenie przy odbiciu, ekranowanie fali odbitej, wielokierunkowość propagacji przy odbiciach od licznych przeszkód. W łączach radiowych i radiokomunikacji ruchomej, szczególnie w terenie o bardzo zróżnicowanej konfiguracji powierzchni (średnio pofałdowanym), stosuje się metody statystyczne określania natężenia PEM, bazujące na wynikach licznych pomiarów i uogólnione w postaci zależności analitycznych lub wykresów [Charytoniuk, 1993].

Określenie tłumienności w łączach radiokomunikacyjnych pracujących w zakresie mikrofal polega na obliczeniu tłumienia w wolnej przestrzeni oraz tłumienia zanikowego. Tłumienie zanikowe służy do uwzględnienia takich cech ośrodka rzeczywistego na trasie propagacji fali elektromagnetycznej, jak niejednorodność, stratność, niestacjonarność i istnienie ewentualnych przeszkód przesłaniających. Tłumienie zanikowe zmienia się losowo i jest uwarunkowane [Charytoniuk, 1993]:

- absorpcją i rozpraszaniem energii fali elektromagnetycznej podczas opadów atmosferycznych,
- dyfrakcją fali elektromagnetycznej i tłumieniem spowodowanymi przeszkodami terenowymi.

W przypadku propagacji mikrofal przechodzących na łączu radiokomunikacyjnym przez atmosferę podstawowe straty transmisji są określone tłumieniem w wolnej przestrzeni, zależnym od długości łącza radiowego oraz częstotliwości.

### 2.3. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ PROMIENIOWANIA MIKROFALOWEGO (ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM EFM)

Bardzo złożone procesy fizyczne związane z oddziaływaniami elektromagnetycznymi wykorzystywane są wszechstronnie w różnorodnych procesach technicznych, bazujących na wykorzystaniu energii elektrycznej, powodując – intencjonalnie lub jako zjawisko pasożytnicze – uwalnianie energii elektromagnetycznej do otoczenia urządzeń i instalacji. Bezpośrednio przy źródłach energię taką określa się terminem „pole elektromagnetyczne”, co sygnalizuje, że procesy elektromagnetyczne w tym obszarze są bardzo złożone, niejednorodne przestrzennie, oraz silnie zależne nie tylko od parametrów źródła, ale również od właściwości i lokalizacji obiektów je otaczających. Takie oddziaływanie elektromagnetyczne powinno być scharakteryzowane przez natężenie pola elektrycznego, w V/m, i przez natężenie pola magnetycznego, w A/m. Natomiast w odległościach przekraczających kilka długości fali i kilkakrotne wymiary geometryczne źródła

PEM przekształca się w propagującą falę promieniowania elektromagnetycznego, której charakterystyka jest uporządkowana i może być satysfakcjonująco opisana poprzez jej polaryzację, częstotliwość zmienności w czasie i poziom propagującej energii (opisany przez natężenie pola elektrycznego, w V/m, lub równoważnie przez gęstość mocy promieniowania, w W/m<sup>2</sup>).

Podkreślenia wymaga, że traktowanie natężenia pola elektrycznego i gęstości mocy promieniowania jako równoważnych parametrów jest niepoprawne w przypadku PEM bezpośrednio przy źródle.

Urządzenia, które emitują promieniowanie mikrofalowe, wykorzystywane są głównie w technikach radarowych, radiokomunikacji i technologiach elektrotermicznych. W tabeli 2.3.1 scharakteryzowano pasma częstotliwości wykorzystywane przez typowe źródła promieniowania mikrofalowego. Szczegółowe częstotliwości przydzielane są dla poszczególnych zastosowań i użytkowników zgodnie z uzgodnieniami międzynarodowymi w ramach międzynarodowej organizacji telekomunikacyjnej (Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny – International Telecommunications Union, ITU), uszczegółowianych do warunków polskich poprzez odpowiednie przepisy [Rozporządzenie Rady Ministrów, 2018].

Należy podkreślić, że liczne aplikacje wykorzystujące promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości wyższej niż 6 GHz stosowane są obecnie w radiokomunikacji typu „punkt-punkt” bądź na terenach niedostępnych powszechnie. Dlatego obserwacje dotyczące skutków oddziaływania takiego promieniowania dotyczą – jak dotąd – głównie pracowników produkujących lub serwisujących urządzenia mikrofalowe. Projektowane wdrożenie systemu 5G wprowadziłoby zatem do środowiska życia ludności praktycznie nowy rodzaj promieniowania – o częstotliwości wyższej niż 6 GHz. Nowość ta wynika z faktu, że żadne z obecnie funkcjonujących źródeł promieniowania mikrofalowego z tego zakresu nie powoduje ekspozycji ludności na promieniowanie znacząco wyższe niż promieniowanie tła. Podsumowując: poza istniejącą ekspozycją na promieniowanie mikrofalowe (TV, telefonia komórkowa 2G–4G itd.) wystąpi ekspozycja na promieniowanie o częstotliwościach fal milimetrowych (w Polsce planowane jest 26 GHz).

Tabela 2.3.1. Zakresy częstotliwości promieniowania mikrofalowego wykorzystywane przez typowe techniki mikrofalowe emitujące promieniowanie w sposób zamierzony

Lp.	Rodzaj urządzenia	Częstotliwości emitowanego promieniowania mikrofalowego		
		pasmo 0,7–6 GHz (w tym 0,9 i 2,45 GHz z pasma ISM)	pasmo 6–15 GHz	pasmo 15–100 GHz
		(pierwszy etap międzynarodowych prac koncepcyjnych projektowanego systemu 5G)	(kolejny etap międzynarodowych prac koncepcyjnych projektowanego systemu 5G)	(dalszy rozwój projektowanego systemu 5G wg międzynarodowych prac koncepcyjnych – częstotliwości fal milimetrowych)
1.	diatermia medyczna (fizykoterapia, terapie onkologiczne – tzw. hipertermia)	tak	nie	nie
2.	urządzenia radarowe (do wykrywania, lokalizacji lub oceny prędkości obiektów cywilnych i wojskowych) – lądowe, lotnicze, nawodne, meteorologiczne (do lokalizacji chmur)	tak	tak	tak
3.	elektrotermia przemysłowa (klejenie materiałów dielektrycznych; suszenie mokrych obiektów – np. drewno, produkty spożywcze, mury budynków; grzanie produktów organicznych – w tym domowe i gastronomiczne kuchnie mikrofalowe)	tak	nie	nie
4.	łączość satelitarna	tak	tak	tak
5.	radiolinie (łączość „punkt-punkt”)	tak	tak	tak
6.	bezprzewodowa łączość naziemna – stan obecny (stacje bazowe i terminale telefonii komórkowej i bezprzewodowego dostęp do internetu, łącza krótkiego zasięgu między urządzeniami)	tak	nie	nie
7.	reaktory mikrofalowe chemiczne (stosowane w celu zwiększenia dynamiki procesów chemicznych)	tak	nie	nie



8.	urządzenia laboratoryjne i naukowe (do grzania, suszenia, aktywnego monitorowania cech obiektów, np. pomiaru wilgotności, odległości, prędkości, grubości, składu chemicznego, struktury)	tak	tak	tak
9.	broń elektromagnetyczna	tak	tak	tak

Uwagi:

techniki mikrofalowe to również szerokie wykorzystanie pomiarów promieniowania mikrofalowego nieujęte w zestawieniu prezentowanym w tabeli,

pasmo częstotliwości radiowych ISM (*Industrial, Scientific, Medical* – „przemysłowe, naukowe, medyczne”) przeznaczone jest do nielicencjonowanego użytku przemysłowego, medycznego i naukowego; częstotliwości promieniowania mikrofalowego, jakie zarezerwowano do użytku nielicencjonowanego określono w Rozporządzeniu Ministra Administracji i Cyfryzacji [2014]; przy urządzeniach mikrofalowych szczególnej uwagi wymaga ich stan techniczny, ponieważ w razie jego pogorszenia może istotnie zwiększyć się poziom promieniowania w otoczeniu urządzenia lub instalacji – zarówno promieniowania emitowanego w sposób zamierzony, jak i promieniowania pojawiającego się w sposób niezamierzony (tj. rozproszonego wskutek pojawienia się np. nieszczelności w łączeniach odcinków falowodów lub elementów generatora i toru wzmacniającego mikrofalowego – tego typu przyczyny mogą spowodować narażenie na promieniowanie mikrofalowe nawet w otoczeniu urządzenia, które konstrukcyjnie nie było przystosowane do emitowania promieniowania na zewnątrz obudowy. Przykładem takiego typu źródeł w środowisku powszechnym są obecnie kuchenki mikrofalowe, wykorzystujące mikrofałe o częstotliwości 2,45 GHz. Konstruowane są one zgodnie z wymaganiami dotyczącymi ograniczania poziomu promieniowania w ich otoczeniu, jednak w miarę degradacji urządzeń wynikającej z długoletniego użytkowania w ich otoczeniu stopniowo zwiększa się poziom promieniowania coraz słabiej ekranowanego przez wyeksploatowane elementy łączące i uszczelniające obudowę).

## 2.4. OCENA WIELKOŚCI EKSPOZYCJI PRZY URZĄDZENIACH SYSTEMU 5G

Opracowanie i chęć wdrożenia systemów 5. generacji (5G) jest wynikiem nieustannego wzrostu zapotrzebowania na pojemność transmisyjną. Jak wskazują wyniki badań przeprowadzonych np. przez firmy Ericsson [2018] i Cisco [2017], istnieje trend w postaci 50–60% rocznego przyrostu ilości danych transmitowanych za pomocą sieci komórkowych. Wielkość ta na przestrzeni ostatnich dwóch dekad wydaje się stała. Wyjściem naprzeciw temu wzrostowi mają być właśnie systemy 5G, które w skrajnych założeniach mają zwiększyć pojemność transmisyjną systemów komórkowych nawet 1000-krotnie. Może stać się to możliwe dzięki m.in. znacząco poszerzanemu zakresowi widma dostępnego dla tych celów (właśnie o pasma SHF i EHF), stosowaniu matryc wieloantenowych do realizacji tzw. masowego MIMO (*massive Multiple Input Multiple Output* – punktu nadawczego z dużą liczbą anten, obsługującego wielu użytkowników, co pozwala osiągnąć dużą wydajność przy minimalnych interferencjach), a także poprzez znaczne zagęszczenie niewielkich obszarowo, lecz bardzo pojemnych transmisyjnie komórek, w których transmisja odbywać się będzie w pasmach częstotliwości 6–100 GHz. Raport zaprezentuje także krótką analizę ilościową zamierzonych celów, jakie stawia się przyszłym systemom 5G.

W Raporcie przeanalizowane zostaną także pasma częstotliwości planowanych dla systemów 5G, zagadnienia związane z promieniowaniem EFM przez stacje bazowe systemów 5G, ich rozchodzenie się w atmosferze oraz przewidywane poziomy bezwzględnych mocy, na jakie mogą być ekspozycyjni użytkownicy oraz osoby postronne. Na podstawie dostępnej literatury przedstawione zostaną uproszczone modele do oceny natężenia pola w otoczeniu anten dla możliwych do określenia scenariuszy montażu stacji bazowych 5G oraz szacunkowa ocena ekspozycji.

### 2.4.1. ZAŁOŻENIA FUNKCJONALNE DLA SYSTEMÓW 5G

Konieczność użycia pasm z zakresu wysokiego SHF (15–30 GHz) oraz najwyższego EHF (30–100 GHz) wynika bezpośrednio z założeń rekomendowanych przez ITU w dokumencie ITU-R M.2083 [2015] dla przyszłych mobilnych systemów telekomunikacyjnych IMT (*International Mobile Telecommunication Systems*) tzw. 5. generacji (5G), lub inaczej IMT-2020:

#### 1. Maksymalna szybkość transmisji:

- 20 Gb/s w łączy „w dół” – od stacji bazowej do użytkownika (*Downlink* – DL) oraz 10 Gb/s w łączy „w górę” – od użytkownika do stacji bazowej (*Uplink* – UL) w szczególnych przypadkach scenariusza eMBB, 100 Mb/s w obszarach miejskich i podmiejskich, 1 Gb/s w budynkach.

2. Szczytowa skuteczna efektywność widmowa  $\eta$  3-krotnie większa (według ITU-R M.2083 [2015]) względem efektywności określonej w ogólnej specyfikacji IMT-Advanced dla systemów 4G (zdefiniowanej w dokumencie ITU-R M.2134 [2008]), czyli odpowiednio:
  - w łączu DL:  $3 \cdot 15 = 45$  b/s/Hz,
  - w łączu UL:  $3 \cdot 6,75 = 20,25$  b/s/Hz.
3. Odczuwalna przez użytkownika (*User Experienced*) szybkość transmisji:
  - w łączu DL: 100 Mb/s,
  - w łączu UL: 50 Mb/s.
4. Docelowa pojemność powierzchniowa ruchu telekomunikacyjnego w łączu DL dla środowisk „hot spot wewnątrz budynków” (*Indoor Hotspot*): 10 Mb/s/m<sup>2</sup>.
5. Opóźnienie maksymalne:
  - w warstwie użytkownika: 1 ms (w scenariuszu URLCC) oraz 4 ms (w scenariuszu eMBB),
  - w warstwie sterowania: 10–20 ms.
6. Minimalna niezawodność transmisyjna: 99,999% (określona dla środowisk „Makrokomórkowych miejskich”, *Urban Macro*, w scenariuszu URLLC):
  - w warstwie użytkownika: 1–4 ms,
  - w warstwie sterowania: 10–20 ms.
7. Mobilność do 500 km/h.
8. Szerokość kanału transmisyjnego (według [MC, 2018]):
  - dla pasm do 1 GHz: ok. 5 MHz,
  - dla pasm z zakresu 3–5 GHz: ok. 10 MHz i więcej,
  - dla pasm z zakresu powyżej 26 GHz: 50 MHz, 100 MHz.

Wymagania te powstały na podstawie wcześniejszych badań nad trendami technologicznymi obserwowanymi w dziedzinie systemów i technik bezprzewodowych, a także nad możliwością zastosowania w przyszłych rozwiązaniach pasm z zakresu powyżej 6 GHz, których wyniki zamieszczono, odpowiednio, w dokumentach International Telecommunication Union – ITU [ITU-R M.2320, 2014 i ITU-R M.2376, 2015]. Wspomniane w nich scenariusze użytkowe są rezultatem równoległych prac wykonanych przez 3GPP (3rd Generation Partnership Project – ciało wewnątrz ITU organizujące współpracę pomiędzy stowarzyszeniami standardów telekomunikacyjnych, znanych jako Partnerzy Organizacyjni), których początkowo zdefiniowano 70 na łamach [3GPP TR 22.891, 2016], następnie zaś zredukowano do 4 podstawowych grup stanowiących obowiązujące scenariusze referencyjne dla systemów 5G:

1. Masowa komunikacja typu maszynowego (scenariusz *massive Machine-Type Communications* – mMTC) [3GPP TR 22.861, 2016]: masowa komunikacja typu „maszyna–maszyna”, z przewidywaną dużą liczbą urządzeń (np. czujników, mierników). Grupa szczególnie odpowiednia dla nowych usług pionowych, takich jak „inteligentny dom”, „inteligentne AGD/peryferia/ubrania”, e-zdrowie itp.
2. Komunikacja Krytyczna (scenariusz *Ultra Reliable Low Latency Communications* – URLLC) [3GPP TR 22.862, 2016]: wysoko niezawodna komunikacja o niskich opóźnieniach w zastosowaniach wymagających niskich opóźnień, dużej niezawodności, dostępności i bezpieczeństwa, np. w przemysłowych aplikacjach sterujących, Internecie Interaktywnym (*Tactile Internet*). Wymagane ulepszone interfejsy radiowe, zoptymalizowane architektury, dedykowane zasoby szkieletowe i radiowe.
3. Ulepszona Mobilna Komunikacja Szerokopasmowa (scenariusz *enhanced Mobile Broadband* – eMBB) [3GPP TR 22.863, 2016]: zastosowania zamierzone na szybką transmisję danych, dużą gęstość użytkowników oraz stacji bazowych, znaczną mobilność użytkowników, urządzenia z dużą dynamiką szybkości transmisji, konwergencję pomiędzy usługami stacjonarnymi i mobilnymi, niewielkie komórki.
4. Operacje Sieciowe (scenariusz *Network Operations* – NO) [3GPP TR 22.864, 2016]: dotyczy wymogów funkcjonalnych, takich jak: elastyczne funkcjonalności, tworzenie nowych wartości, migracja i współpraca między sieciami (*internetworking*), optymalizacje, ulepszenia i bezpieczeństwo.

W kontekście zaprezentowanych kryteriów wydajnościowych na szczególną uwagę zasługują tu scenariusze eMBB i URLLC, wymagające wysokich poziomów doświadczanej przez użytkownika przepustowości oraz efektywności widmowej. Odpowiedzią na nie jest zalecenie zastosowania zwłaszcza 3 rozwiązań, które będzie warunkowało spełnienie wspomnianych wymogów w przyszłych systemach 5G:

1. Wieloantenowych technik MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), opisywanych zwykle liczbą wierszy (N) i kolumn (M) w zespole antenowym (jako  $N \times M$ ), zwanych także masowym MIMO (*massive MIMO*), umożliwiających multipleksację (zwielokrotnienie) przestrzenną strumieni danych, przekładającą się na maksymalnie N-krotne zwiększenie przepustowości w stosunku do transmisji SISO (*Single Input Single Output*). Zakładana oczekiwana maksymalna liczba anten nadawczych (Tx) lub odbiorczych (Rx) to 256 [3GPP TR 38.913, 2018], choć [3GPP TR 38.802, 2017] przewiduje użycie 256 anten Tx/Rx w pasmach ok. 30 GHz i nawet do 1024 anten Tx/Rx w pasmach ok. 70 GHz.

2. Sieci ultragęstych UDN (*Ultra Dense Networks*), zakładających ok. 10-krotnie większą gęstość lokalizacji stacji bazowych niż w przypadku systemów 4G.
3. Dodanie nowych pasm częstotliwości w zakresie do 100 GHz [3GPP TR 38.913, 2018], gwarantujących transmisję danych na kanałach transmisyjnych o dużych szerokościach (nawet do BW = 100 MHz). Organizacja 3GPP na potrzeby twórców przyszłych systemów radiokomunikacyjnych ustaliła w dokumencie [3GPP TS 38.104, 2018] maksymalną szerokość pojedynczego kanału transmisyjnego (w sensie sumarycznej szerokości kanałów zagregowanych w danej stacji bazowej) – BW = 400 MHz (z użyciem techniki OFDM), zaś dla zagregowanych kanałów – BW do 1 GHz [3GPP TR 38.802, 2017]. Grupa firm, m.in. Cisco, AT&T, Nokia, Ericsson, Huawei, Intel, DOCOMO, Qualcomm, prognozuje także transmisję na zagregowanych kanałach o szerokości wartości BW do 2 GHz [5GCHFB, 2017]. Informacje te znajdują zastosowanie w dalszej części rozdziału, gdzie szerokość kanału będzie użyta jako jeden z decydujących parametrów wpływających na czułość systemu radiokomunikacyjnego, a tym samym – znając moc wypromieniowaną oraz tłumienie propagacyjne – na zasięg pojedynczych stacji bazowych 5G, i co za tym idzie, na gęstość ich lokalizacji. Pozwoli to w rezultacie określić także poziom sumarycznego narażenia użytkownika znajdującego się w ich zasięgu.

#### 2.4.2. PASMA CZĘSTOTLIWOŚCI PRZEZNACZONE DO ZASTOSOWANIA W SYSTEMACH 5G

O ile cele użytkowe stawiane systemom 5G, zaprezentowane w rozdziale 2.4.1, są oczywiste, tak wciąż otwartą kwestią pozostaje zarówno definicja konkretnych rozwiązań technologicznych, jak i przydział ściśle określonych pasm częstotliwości, w których systemy te będą pracować. W tabeli 2.4.1 zaprezentowano propozycje opracowane przez główne instytucje regulujące i kształtujące otoczenie telekomunikacyjne. Założenia w zakresie przeznaczeń częstotliwości dla bezprzewodowych usług szerokopasmowej łączności elektronicznej oraz rozwoju sieci 5G zostały określone przez Prezesa Urzędu Komunikacji Elektronicznej w dokumencie [UKE, 2018]:

- 700 MHz: 2×30 MHz na rezerwacje krajowe, w blokach o wielokrotności 5 MHz, w trybie FDD (pasmo ma zostać uwolnione do 30.06.2022),
- 3400–3600 MHz; planowane uwolnienie (do 2025 r.) co najmniej 150 MHz, w blokach o wielokrotności 5 MHz, w trybie TDD,
- 3600–3800 MHz; planowane uwolnienie (do 2023 r.) co najmniej 200 MHz, w blokach o wielokrotności 5 MHz, w trybie TDD,

- 26 GHz (zwolnienie zasobów dla 5G).

Pierwszy zestaw pasm kandydackich dla przyszłych szerokopasmowych systemów radiowych został wskazany w trakcie Światowej Konferencji Radiowej w 2015 r. (WRC'15), w którym określono 7 nowych zakresów. Na mocy mandatu udzielonego przez Komisję Europejską w grudniu 2016 r., CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) została zobligowana do zharmonizowania warunków technicznych dla rozwoju sprzętu 5G w obrębie Unii Europejskiej i przygotowania rekomendacji pasm poddanych następnie pod głosowanie w trakcie WRC'19. Owoce wspólnej pracy z Grupą Roboczą TG5/1 ITU była nieco zmodyfikowana lista. Zdefiniowano także tzw. listę priorytetową pasm cieszących się największym zainteresowaniem partnerów przemysłowych, o sumarycznej szerokości 11,75 GHz.

W odpowiedzi na ustalenia WRC'15 3GPP zaproponowała 2 nowe zakresy częstotliwości FR1 (450–6000 MHz) i FR2 (24,25–52,60 GHz), dzieląc każdy z nich na podpasma NR (*New Radio*): n1–n86 w zakresie FR1 i n257–n261 [3GPP TS 38.104, 2018]. Wynikowa sumaryczna szerokość nowych pasm FR2 wynosi zatem 10,1 GHz.

Prace w zakresie alokacji nowych pasm na potrzeby systemów 5G USA zakończyły się przeznaczeniem łącznie 10,85 GHz w 3 wydzielonych pasmach [FCC, 2016], nazwanych „Granicami Widmowymi” (*Spectral Frontiers*).

Tab. 2.4.1. Przydział pasm częstotliwości dla przyszłych systemów 5G

Nazwa pasma	WRC'15 / WRC'19 <sup>[1]</sup>	CEPT ITU TG5/1 (ECC),	3GPP	FCC
26 GHz / n258 (wg 3GPP)	24,25–27,50 GHz	24,25–27,5 GHz <sup>[2]</sup>	24,25–27,5 GHz	
n257 (wg 3GPP)			26,5–29,5 GHz	27,5–28,35 GHz
n261 (wg 3GPP)		wykreślone <sup>[3]</sup>		
32 GHz / n260 (wg 3GPP)	31,8–33,4 GHz		27,5–28,35 GHz	
37 GHz	37–43,5 GHz	37,4 <sup>[2]</sup> –43,5 GHz	37–40 GHz	37–40 GHz
48 GHz	45,5–50,2 GHz	45,5–50,2 GHz		
51 GHz	50,4–52,6 GHz	50,4–52,6 GHz		
70 GHz	66–76 GHz	66–71 <sup>[2]</sup> /76 GHz		
84 GHz	81–86 GHz	81–86 GHz		64–71 GHz

<sup>[1]</sup> wstępnie wskazane w trakcie WRC'15 jako możliwe do wykorzystania w przyszłych szerokopasmowych systemach bezprzewodowych i przekazane do dalszych analiz. Ostateczna decyzja w trakcie WRC'19.

<sup>[2]</sup> pasma z listy priorytetowej określonej w postanowieniu 2. Uchwały 238 (*Resolve 2, Resolution 238*) podjętej w trakcie Światowej Konferencji Radiokomunikacyjnej (WRC'15), Genewa, 2015.

<sup>[3]</sup> wykreślone na mocy postanowienia 2. Uchwały 238 (*Resolve 2, Resolution 238*) podjętej w trakcie Światowej Konferencji Radiokomunikacyjnej (WRC'15), Genewa, 2015, z uwagi na niekompatybilność z usługami radionawigacyjnymi.

### 2.4.3. ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA FAL MILIMETROWYCH W SYSTEMACH 5G, PROPAGACJA, MOC SYGNAŁU ELEKTROMAGNETYCZNEGO DOCIERAJĄCEGO DO UŻYTKOWNIKA

Jak przekładają się fakty podane w rozdz. 2.4.2 na korzyści dla użytkownika końcowego? W wielu publikacjach [Rappaport, 2013; Rangan, 2014; Ghosh, 2014; Roh, 2014] wykazano, iż w kanale o szerokości 1 GHz w pasmach 28 i 73 GHz można uzyskać pojemności rzędu kilkunastu Gb/s do użytkownika przy zastosowaniu matryc antenowych o rozmiarze 4×4 elementy i odległościach pomiędzy komórkami ISD (*Inter-Site Distance*) nieprzekraczających 200 m (dla pasm 28 GHz i 38 GHz, dla wyższych zaś ISD muszą być odpowiednio mniejsze).

Nadejście ery systemów 5G nie oznacza rezygnacji z rozwiązań starszych generacji, szczególnie LTE, pracujących w pasmach FR1 poniżej 6 GHz. Wręcz przeciwnie – ich użycie wbuduje się w nową architekturę systemów 5G [3GPP TR 38.804, 2017], zakładającą hierarchiczną strukturę komórkową. Komórki utworzone przez stacje bazowe pracujące w pasmach < 6 GHz (eNB – *evolved Node-B*), umożliwiające osiąganie większych zasięgów w warunkach zarówno bezpośredniej widoczności (LOS – *Line of Sight*) jak i przy jej braku (NLOS – *Non Line of Sight*), będą wciąż wykorzystywane, głównie do celów pokryciowych i dla usprawnienia mobilności. Komórki 5. generacji natomiast (gNB – *next Generation Node-B*) będą zapewniać dużą pojemność jako „komórki pojemnościowe” [Okumura, 2014], choć na niewielkich zasięgach, co z kolei będzie wymuszać ich gęstą lokalizację dla zapewnienia ciągłości pokrycia.

Określono zatem [3GPP TR 39.900, 5GCHFB, 2017] 3 typy komórek dla systemów 5G, wskazując jednocześnie na typowe scenariusze ich instalacji, definiując kluczowe parametry związane z instalacją anten stacji bazowych gNB oraz gęstością ich rozlokowania. Scenariusze te obejmują:

1. Makrokomórkę UMa (*Urban Macro Cell*) obsługującą użytkowników znajdujących się na zewnątrz (*Outdoor-to-Outdoor* – O2O) jak i tych wewnątrz budynków (*Outdoor-to-Indoor* – O2I), z zastosowaniem pasm częstotliwości do 1 GHz według [MC, 2018], z uwagi na właściwości propagacyjne fal o tych częstotliwościach, zapewniające właściwe pokrycie terenu oraz dobrą penetrację wewnątrz budynków.

2. Mikrokomórkę UMi (*Urban Micro Cell*) instalowaną głównie do obsługi gęsto rozlokowanych użytkowników znajdujących się na zewnątrz budynków (*outdoor*): 1. na chodnikach wzdłuż dróg i ulic (piesi) oraz w pojazdach, a także 2. na otwartych placach (do szerokości 50 m). Planowane pasmo pracy to MF, pozwalające na realizację usług typu URLLC.
  3. Pikokomórkę (*Small Cell*) pracującą w paśmie HF, o zasięgu od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, wykorzystywaną jako lokalny punkt dostępowy w takich miejscach jak stadiony czy przestrzeń publiczna.
  4. Femtokomórkę, czyli hotspot wewnętrzny InH (*Indoor Hotspot*), do obsługi środowisk typu: otwarte/zamknięte biuro czy centra handlowe. Przeznaczone pasmo pracy: wysokie.
- Zestawienie rekomendowanych parametrów roboczych przewidzianych dla tych środowisk zaprezentowano w tabeli 2.4.2.

Tab. 2.4.2. Wybrane parametry robocze dla scenariuszy użytkowych 5G [3GPP TR 39.900]

Scenariusz / rodzaj komórki 5G	Wysokość zawieszenia anten Tx stacji bazowej ( $h_{gNB}$ )	Szybkość poruszania się terminala ( $v_{UT}$ )	Odległość między stacjami bazowymi (ISD) <sup>[1]</sup>	Częstotliwość środkowa ( $f$ )
UMa	25 m	3 km/h	500 m	0,8 GHz < $f$ < 100 GHz
UMi	10 m		200 m	
InH	3 m		20 m	

<sup>[1]</sup> zasięg (promień) komórki jest połową ISD.

Za bazę do obliczeń czułościowych, będących też podstawą do wyznaczania niezbędnych mocy promieniowanych przez stacje bazowe, przyjęto maksymalną (według 3GPP) szerokość pojedynczego kanału, wynoszącą  $BW = 400$  MHz. Całkowity szum termiczny określany jest relacją (2.4.1), gdzie NF oznacza współczynnik szumowy, zaś IM margines implementacyjny.

$$N_{tot} = -174 \text{ dBm} + 10 \log(BW_{Hz}) + NF + IM \quad (2.4.1)$$

Zależność współczynnika szumowego NF wzmacniaczy LNA (wykonanych z najlepszych dostępnych elementów) zamodelowano w [Andersson, 2017] w postaci krzywej proporcjonalnej do  $f^{0,5}$ , która pozwala na oszacowanie wartości minimalnych NF dla skrajnych częstotliwości analizowanego zakresu jako:  $NF(15 \text{ GHz}) = 1,8 \text{ dB}$  i  $NF(100 \text{ GHz}) = 5,6 \text{ dB}$ . Yiming [2017] zaproponował stosowanie do celów referencyjnych wartości 7 dB. Na wielkość marginesu implementacyjnego wpływają natomiast tłumienie sygnału w trakcie filtracji oraz układy transceivera (routing i przełączanie), dla których można przyjąć następujące wartości [Andersson, 2017]:  $IM(15 \text{ GHz}) = 1,2 \text{ dB}$  oraz  $IM(100 \text{ GHz}) = 4 \text{ dB}$ . Czułość urządzenia 5G,  $P_{cz}$ , będącą minimalną mocą wymaganą



do realizacji usługi przy określonej modulacji i sprawności kodowania, zadana jest zatem wzorem 2.4.2.

$$P_{CZ} = N_{TOT} + SNR \quad (2.4.2)$$

Tab. 2.4.3. Limity dla skutecznej mocy wypromieniowanej izotropowo (*Equivalent Isotropic Radiated Power – EIRP*) wg FCC [FCC, 2016]

Rodzaj urządzenia	EIRP <sub>max</sub>		EIRP <sub>e</sub> dla matrycy antenowej o wymiarze N×N
	pasma do 40 GHz [FCC, 2016]	pasma 57–71 GHz [FCC, 2013]	
UT	43 dBm	40 dBm (średnio) 43 dBm (maksymalnie)	EIRP <sub>max</sub> – 10log <sub>10</sub> (N)
gNB	$\left(75 + 10\log_{10}\left(\frac{BW_{MHz}}{100 MHz}\right)\right)$ dBm <sup>[1]</sup>		
TS	55 dBm		
FPP	–	82 dBm (średnio) <sup>[2]</sup> 85 dBm (maksymalnie) <sup>[2]</sup>	

Przykłady obliczeniowe:

1. Dla kanału o szerokości BW = 200 MHz, EIRP<sub>max</sub> wynosi:

dla UT i TS, odpowiednio: 43 dBm i 55 dBm

dla gNB:  $(75 + 10\log_{10}(200 \text{ MHz}/100 \text{ MHz}))$  dBm = (75+3) dBm = 78 dBm

2. Dla matrycy antenowej o rozmiarach 16×16, kanału o szerokości BW = 200 MHz, maksymalna moc promieniowana pojedynczego elementu antenowego EIRP<sub>e</sub> wynosi:

dla UT: 43 dBm – 10log<sub>10</sub>(16) = 43 dBm – 12 dB = 31 dBm

dla gNB: 78 dBm – 10log<sub>10</sub>(16) = 78 dBm – 12 dB = 66 dBm

dla TS: 55 dBm – 10log<sub>10</sub>(16) = 55 dBm – 12 dB = 43 dBm

<sup>[1]</sup> oznacza to, że dla BW<sub>max</sub> = 400 MHz (za [3GPP TS 38.104, 2018]), EIRP<sub>max</sub> = 81 dBm, dla BW<sub>max</sub> = 1 GHz (za [3GPP TR 38.802, 2017]) EIRP<sub>max</sub> = 85 dBm, dla BW<sub>max</sub> = 2 GHz (za [5GCHFB, 2017, Rappaport, 2017]) EIRP<sub>max</sub> = 88 dBm.

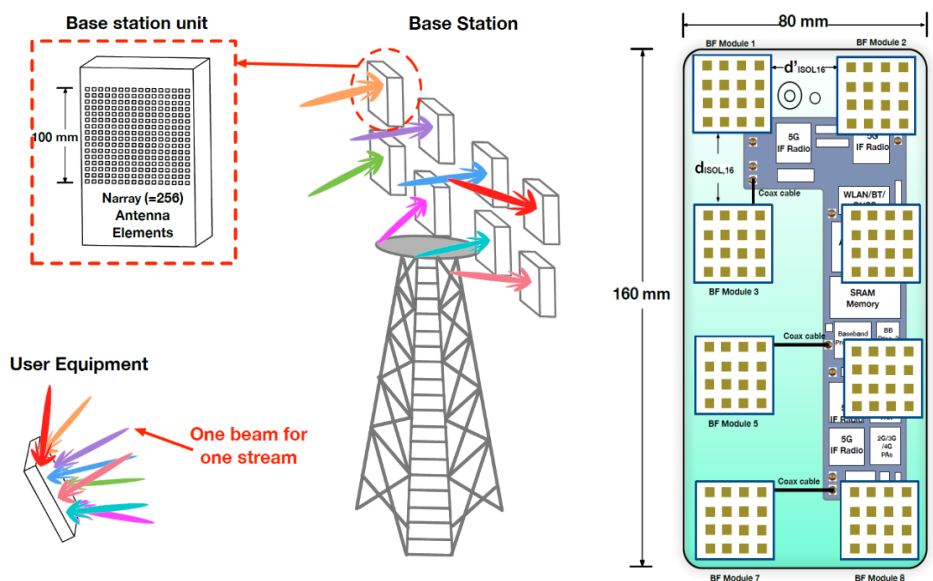
<sup>[2]</sup> wartość EIRP<sub>max</sub> należy pomniejszyć o 2n [dB], w przypadku gdy zysk anteny G<sub>ant</sub> [dBi] jest mniejszy niż 51 dBi, gdzie n jest równe: 51 dBi – G<sub>ant</sub>.

Różnica pomiędzy skuteczną mocą wypromieniowaną izotropowo (EIRP) a czułością określa maksymalne dopuszczalne tłumienie propagacyjne, które można wyznaczyć za pomocą modeli propagacyjnych zawartych w 3GPP TR 39.900, specyfikujących tłumienie w zależności od środowiska (UMa, UMi, InH) oraz rodzaju widoczności (LOS, NLOS). Z kolei maksymalna EIRP została dotychczas określona jedynie w dokumentach FCC, która w dokumencie FCC [2016] przedstawiła (w formie porozumienia kompromisowego z partnerami przemysłowymi: Qualcomm, Samsung, Verizon, Intel, Nokia i Ericsson) graniczne poziomy EIRP, osobno dla stacji bazowych gNB, terminali użytkowników UT (*User Terminal*), stacji przenośnych TS (*Transportable Stations*)

oraz stałych łączy zewnętrznych „punkt-punkt” FPP (*Fixed Point-Point*), jak podano w tabeli 2.4.3. Prawa kolumna tabeli obrazuje sposób skalowania mocy wypromieniowanej przez pojedynczy element matrycy antenowej ( $EIRP_{el}$ ) o wymiarze  $N \times N$ , w celu spełnienia warunku na maksymalną EIRP (czyli  $EIRP_{max}$ ) emitowaną przez urządzenie [gNB/UT]. Jak można zauważyć,  $EIRP_{max}$  dla stacji bazowych została wyrażona w postaci granicznej EIRP przypadającej na każde 100 MHz pasma, skalowanej następnie przez szerokość kanału BW [MHz].

Duże wartości EIRP w tabeli 2.4.3 wynikają oczywiście z faktu powszechnego stosowania w systemach 5G matryc antenowych – zarówno po stronie gNB, jak i UT (jak na ryc. 2.4.1) – generujących wąskie wiązki promieniowania (i tym samym duże zyski energetyczne  $G$ ), np. kąt połowy mocy HPBW (*Half-Power Beam Width* oznaczony również jako  $\theta_{-3dB}$ ) matrycy antenowej o rozmiarze  $N \times N$  wynosi w przybliżeniu  $114,6/N$  [deg], zatem:

1. Dla  $N=16$ : HPBW=7,2 [deg];  $G=12$  dBi.
2. Dla  $N=64$ : 1,8 [deg];  $G=18$  dBi.
3. Dla  $N=256$ : 0,5 [deg];  $G=24$  dBi.



Ryc. 2.4.1. Przykładowy wygląd i rozlokowanie matryc antenowych w antenach gNB (po lewej) oraz UT (po prawej) [Yiming, 2017]

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż jak zilustrowano schematycznie na ryc. 2.4.1, system antenowy stacji bazowej gNB będzie składał się z pewnej liczby identycznych, podstawowych matryc/paneli wieloantenowych (każdy o rozmiarze  $N \times M$ ). Konfigurację takiego systemu będzie opisywał zbiór 5 parametrów:  $\{M_g, N_g, M, N, P\}$ , gdzie:

- $M_g$  to liczba matryc/paneli antenowych w pojedynczej kolumnie,

- $N_g$  to liczba matryc/paneli antenowych w pojedynczym rzędzie,
- P informuje o tym, czy w pojedynczym panelu składowym zastosowano zwielokrotnienie polaryzacyjne H i V (wówczas  $P = 2$ ), czy też zastosowano pojedynczą polaryzację H lub V (wówczas  $P = 1$ ).

Cytowane w tabeli 2.4.3 wartości  $EIRP_{max}$  dotyczą całkowitej skutecznej mocy wypromieniowanej łącznie przez wszystkie anteny składowe znajdujące się na danej stacji bazowej gNB (za [FCC, 2016]). Po lewej stronie ryc. 2.4.1 wskazano również dwojaki cel stosowania złożonych wieloelementowych matryc antenowych: do kształtowania wąskich wiązek śledzących danego użytkownika (*beamforming*) oraz do transmisji wielostrumieniowej MIMO, często stosując oba rozwiązania jednocześnie dla równoległej obsługi wielu użytkowników. Z uwagi na wąskie wiązki promieniowania, pojedynczy użytkownik będzie zatem w świetle pola pochodzącego od relatywnie niewielkiej ich liczby (głównie „swojej”, śledzącej jego ruch), a tym samym na pewien ułamek całkowitej EIRP emitowanej przez stację bazową. Analogicznie, osoby postronne – niekorzystające w danej chwili z systemu 5G – będą poddane oddziaływaniu pola od wiązek antenowych przewidzianych dla osób używających systemu w ich najbliższym otoczeniu. W systemach obecnie stosowanych obszar użytkowy pokrywany jest z reguły antenami o szerszych wiązkach, bez możliwości przypisywania ukierunkowanych wiązek dla poszczególnych użytkowników. Można to wytłumaczyć następująco: w obecnych systemach sygnał (reprezentowany przez energię elektromagnetyczną) przeznaczony dla konkretnego użytkownika jest emitowany w całym obszarze obsługiwanym przez dany sektor stacji bazowej. Stosowanie wiązek dedykowanych spowoduje, że energia przeznaczona dla danego użytkownika będzie emitowana tylko w jego kierunku – można zatem przyjąć, że całkowita energia wyemitowana przez stację bazową dla obsługi tego użytkownika będzie w efekcie mniejsza, niż w obecnie funkcjonujących systemach. Dodatkowy zysk antenowy wynikający ze stosowania matryc wieloantenowych wyniesie tym samym 18 dB i 30 dB, dla matryc, odpowiednio, 256-antenowych (w pasmach ok. 30 GHz) i 1024-antenowych (w pasmach ok. 70 GHz). Z drugiej strony należy pamiętać, że fale radiowe z pasm HF, dla których planuje się stosowanie technik wieloantenowych, charakteryzuje większe tłumienie propagacyjne niż częstotliwości obecnych systemów generacji 2G–4G czy też pasm LF/MF 5G. Biorąc pod uwagę już samo tłumienie wolnej przestrzeni, opisujące osłabianie strumienia gęstości mocy EM wskutek ekspansji przestrzennej, tłumienie to dla częstotliwości 26 GHz (pasmo HF) jest wyższe niż dla pasm stosowanych obecnie w systemach komórkowych generacji 2G–3G:

- o 23 dB niż w GSM 1800 MHz,
- o 21 dB niż w UTMS 2100 MHz,

- o 20 dB niż w LTE 2600 MHz,
- o 17 dB niż dla częstotliwości 3600 MHz (środkowa częstotliwość pasma MF 5G).

Jak zostanie ilościowo zademonstrowane dalej, tłumienie to jest wyższe wskutek interakcji fali HF także z innymi czynnikami, zaś wynikowe tłumienie sygnału radiowego ostatecznie docierającego do użytkownika będzie sumą tych tłumień.

Pomijając wpływ czynników takich jak roślinność, tłumienie ciała ludzkiego, tłumienie przejścia sygnału przez szybę samochodową czy deszcz, tłumienie propagacyjne sygnałów w suchym powietrzu, można obliczyć przy użyciu modeli propagacyjnych zawartych w [5GCHFB, 2017], [Rappaport, 2017], [3GPP TR 38.900, 2016]. Zestawienie tłumień dla skrajnych częstotliwości analizowanego zakresu zaprezentowano w tabeli 2.4.4. Z uwagi na to, iż rozkład użytkowników w każdym scenariuszu jest losowy i równomierny, opracowane zostały także probabilistyczne modele wystąpienia warunków LOS w postaci wzorów wykładniczych, w których prawdopodobieństwo zaistnienia bezpośredniej widoczności maleje wraz z odległością: dla scenariuszy UMa i UMi w [5GCHFB, 2017], dla scenariusza InH w [3GPP TR 38.873, 2017]. Należy bardzo wyraźnie podkreślić, że w scenariuszach dla EFM człowiek jest traktowany jako istotna przeszkoda, a szacowane tłumienia wtrąceniowe z powodu przesłonięcia wiązki przez postać ludzką osiągają nawet ponad 20 dB – stąd też przyjęto minimalną wysokość zawieszenia anten zewnętrznych na 10 m.

Tab. 2.4.4. Wynikowe tłumienie propagacyjne na podstawie [5GCHFB, 2017]

Scenariusz / rodzaj komórki 5G		15 GHz		100 GHz	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS
UMa (dla d = 250 m)		104 dB	131 dB	120 dB	147 dB
Umi (dla d = 100 m)	kanion uliczny	96 dB	118 dB	112 dB	136 dB
	otwarty plac	96 dB	-	112 dB	-
InH (dla d = 10 m)	biuro	73 dB	85 dB	90 dB	105 dB
	centrum handlowe	73 dB	-	90 dB	-

Wartości EIRP wykazane w tabeli 2.4.3, pomniejszone o wielkość tłumienia propagacyjnego zestawionego w tabeli 2.4.4, pozwalają na określenie mocy docierającej do odbiorcy na brzegu zasięgu w każdym z 3 scenariuszy użytkowych. Powyższe analizy dotyczą anten stacji bazowych. Należy tu również wziąć pod uwagę, że oczekuje się łączności dwukierunkowej i analogiczne tłumienie musi być uwzględnione dla łącza „w górę” (UL), czyli trasy użytkownik–stacja bazowa, co

implikuje konieczność uzyskania odpowiednio dużego EIRP również po stronie użytkownika (nawet uwzględniając dużo większy zysk anten stacji bazowych). Przy braku optymalizacji mogłoby to prowadzić do przekroczenia wartości granicznych SAR i gęstości mocy dla terminali przenośnych UT, dlatego zgodnie z wytycznymi FCC [2016] nieprzekraczalny EIRP dla UT wynosi 43 dBm. Przy możliwych do uzyskania zyskach anten terminali w paśmie fal milimetrowych na poziomie maksymalnie 10 dBi daje to moce nadajników zbliżone do obecnie stosowanych (1–2 W), co pozwoli utrzymać obecne standardy ochrony użytkowników.

Fale elektromagnetyczne są absorbowane w atmosferze zależnie od ich częstotliwości. Za absorpcję sygnału są odpowiedzialne w szczególności 2 czynniki: tlen cząsteczkowy ( $O_2$ ) oraz para wodna ( $H_2O$ ). Jak wynika z modelu tłumienia w gazach atmosferycznych ([ITU, 2016] i [3GPP TR 38.900, 2016]), wynikowe tłumienie jednostkowe  $L_{gaz}$  nie jest jednorodne, lecz charakteryzuje się silnymi maksimami rezonansowymi na częstotliwościach:

- 22 GHz (ze względu na  $H_2O$ )  $L_{gaz} = 0,2$  dB/km,
- 63 GHz (ze względu na  $O_2$ )  $L_{gaz} = 17$  dB/km.

Tłumienie w roślinności  $L_{weg}$  możliwe jest do oszacowania za pomocą odpowiednich modeli pokrywających zakres częstotliwości 200 MHz–95 GHz (MED, FITU-R oraz COST 235, jak zestawiono w [Adesoye, 2014]), z których wynika, że na brzegach analizowanego zakresu częstotliwościowego oraz przy założeniu głębokości penetracji roślinności równej 10 m (co mniej więcej odpowiada koronie dużego drzewa lub dwóch mniejszych stojących obok siebie, np. wzdłuż ulicy):

- dla 15 GHz  $L_{weg} = 14$  dB,
- dla 100 GHz  $L_{weg} = 25$  dB.

Badania nad tłumieniem fal EM przez organizm ludzki z kolei wskazują na to, iż głębokość wnikania (czyli głębokość, na której gęstość mocy penetrującej ciało spada do ok. 10% poziomu mocy wnikającej przez jej powierzchnię) waha się od wartości 2–3,3 mm dla częstotliwości 15 GHz do 0,45–0,6 mm dla częstotliwości 100 GHz [Rappaport, 2015]. Oznacza to, że fale radiowe z tego zakresu będą oddziaływać bezpośrednio głównie przy powierzchni organizmu (w ok. 90%), tj. na warstwę naskórka i skóry właściwej oraz oko [Wu i wsp., 2015b]. Pomiaru konduktywności [Wu i wsp., 2015a] pokazują natomiast, że  $\sigma$  osiąga wartości z przedziału 32–40 S/m dla częstotliwości z zakresu 4–100 GHz, co oznacza, iż ciało ludzkie praktycznie całkowicie blokuje strumień gęstości mocy EM dla wyższego zakresu EHF, zaś dla górnej połowy SHF tłumienie to sięga ok. 30 dB (za Okumura [2014]). Wnioski te uzasadniają przytoczone w tabeli 2.4.2 sugerowane zawieszenie

anten gNB w środowisku mikrokomórkowym na wysokości nie mniejszej niż 10 m, właśnie z uwagi na prawdopodobne blokowanie sygnału przez przechodniów w przypadku niższych lokalizacji.

Z kolei tłumienie fal EM w deszczu można wyznaczyć na podstawie ITU [2005] oraz ITU [1994] przez dobór intensywności opadowej  $R$  [mm/h] charakterystycznej dla danej strefy opadowej. Dla polskich stref opadowych (E – na północy, H – w centrum i na południu) zestawienie oczekiwanego tłumienia jednostkowego  $\gamma_R$  w deszczu, przekraczającego przez 0,1% i 0,01% roku, przedstawiono w tabeli 2.4.5. Wskazuje ono, iż na odległościach od gNB rozważanych dla systemów 5G (do 500 m dla scenariusza UMa, jak w tabeli 2.4.2) tłumienie wynikające z opadów deszczu wyniesie maksymalnie ok. 1 dB oraz nieco ponad 7 dB, odpowiednio dla częstotliwości 15 GHz i 100 GHz.

Tab. 2.4.5. Wynikowe tłumienie jednostkowe w deszczu  $\gamma_R$  [dB/km]

Częstotliwość	Strefa opadowa	Polaryzacja H		Polaryzacja V	
		0,1%	0,01%	0,1%	0,01%
		tłumienie jednostkowe $\gamma_R$ [dB/km]			
15 GHz	E	0,3	0,6	0,3	0,6
	H	1,4	2,2	1,3	1,9
100 GHz	E	4,6	6,6	4,6	6,5
	H	11,2	14,5	11,1	14,3

Tłumienie sygnału na przeszkodach (ścianach, szybach okiennych itp.), które dotyczy głównie scenariuszy mieszanych, w których np. fala EM wnika z zewnątrz do wewnątrz budynku bądź oszklonego pojazdu, zestawiono w formie prostych zależności logarytmiczno-liniowych w postaci  $A+B \cdot f$  (gdzie  $A$  i  $B$  to stałe, natomiast  $f$  to częstotliwość wyrażona w [GHz]) w 3GPP TR 38.900 [2016]. Zestawienie tłumienia dla skrajnych częstotliwości analizowanego zakresu, dla typowych materiałów budowlanych, przytoczono w tabeli 2.4.6.

Tab. 2.4.6. Tłumienie wnoszone przez określone materiały budowlane [dB] wg 3GPP TR 38.900 [2016]

Rodzaj materiału	Wartość parametru modelu		Częstotliwość	
	A	B	15 GHz	100 GHz
Okno wieloszybowe	2	0,2	5 dB	22 dB
Szyba samochodowa	23	0,3	27,5 dB	53 dB
Beton	5	4	65 dB	405 dB
Drewno	4,85	0,12	6,7 dB	16,9 dB

Z analizy powyższych danych wynika, że w środowisku mikrokomórek zewnętrznych, dla uzyskania oczekiwanych tłumień trasy, niezbędne będzie raczej śledzenie użytkownika przez kilka wiązek stacji bazowych z różnych lokalizacji, niż maksymalizacja mocy promieniowanej stacji bazowej. Teoretycznie powinno to skutkować mniejszym obciążeniem energią EM całego obszaru obsługiwanego przez stację, ale w otoczeniu obsługiwanego użytkownika EM będzie ono zbliżone do występującego obecnie.

#### 2.4.4. PEM W ŚRODOWISKU OD STACJI BAZOWYCH SYSTEMÓW 5G

W poprzednich podrozdziałach przedstawiono przegląd założeń systemu 5G pod kątem oszacowania mocy promieniowanych przez stacje bazowe. Do analizy ekspozycji środowiska na PEM przyjęto rekomendowane parametry komórek zgodnie z [3GPP TR 38.900, 2016] i dla takich parametrów określono dopuszczalne moce EIRP anten stacji bazowych skierowanych na określony punkt przestrzeni pozwalający zachować polskie standardy środowiskowe (tabela 2.4.7).

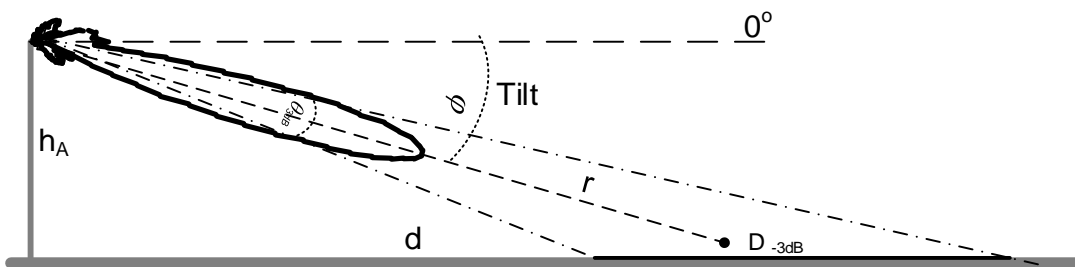
Tab. 2.4.7. Parametry komórek dla analizy ekspozycji

Scenariusz / rodzaj komórki 5G	Wysokość zawieszenia anten Tx stacji bazowej ( $h_{gNB}$ )	Promień komórki
UMa	25 m	500 m
Umi	10 m	200 m

Ponieważ autorzy nie mają dostępu do danych technicznych niezbędnych do przeprowadzenia symulacji rozkładu natężenia PEM uruchomionych już na świecie sieci 5G, a dane literaturowe do

testów czy analiz numerycznych bazują na założeniach nieprzekraczania limitów mocy opracowanych przez FCC [2016], do analiz przyjęto następujący scenariusz: natężenie pola wyznacza się z modelu fali kulistej dla swobodnej przestrzeni, bez uwzględniania żadnych tłumień i przy założeniu, że analizowany punkt leży na kierunku maksymalnego promieniowania anteny (Ryc. 2.4.2). Jest to przypadek najgorszy z punktu widzenia ekspozycji środowiskowej.

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot EIRP}}{r} \quad (2.4.3)$$



Ryc. 2.4.2. Przyjęty do analiz schemat dystrybucji PEM w środowisku

Przyjęto jako wartość graniczną  $E = 7 \text{ V/m}$  na wysokości 2 m nad poziomem terenu (npt) i wyznaczono maksymalne moce  $EIRP_{max}$  dla różnych kątów pochylecia anteny (tilt), symulujących śledzenie użytkowników (tym samym dla różnej odległości  $d$ , w której wiązka trafia w ziemię). Jako tilt minimalny przyjęto taki kąt, w którym wiązka trafia w ziemię na granicy promienia komórki (dla UMa  $d_{max} = 250 \text{ m}$ , UMi  $d_{max} = 100 \text{ m}$ ). Parametry pojedynczej wiązki antenowej przyjęto na poziomie  $6^\circ$  w pionie i poziomie (wartość zbliżona do możliwości matrycy o  $N = 16$  lub takiego fragmentu matrycy większej) i dla takiej wiązki wyznaczono przybliżoną średnicę  $D_{-3dB}$  obszaru, na którym natężenie pola spadnie do 0,7 wartości maksymalnej (tj. o 3 dB).

Wyniki w tabeli odnoszą się do sytuacji, kiedy w danym punkcie/obszarze występuje pole tylko od jednej anteny/wiązki. Przyjmując, że taki obszar może być opromieniowany większą liczbą wiązek, można wskazać prosty wyznacznik ograniczenia  $EIRP_n$  dla każdej wiązki przy  $n$  wiązkach:

$$EIRP_n [dBm] = (EIRP_{max} - 3 \cdot (n - 1)) [dBm] \quad (2.4.4)$$

Na przykład dla 5 wiązek na danym obszarze  $EIRP$  pojedynczej wiązki powinno być mniejsze o 12 dB niż dla pojedynczej wiązki. Jednocześnie jeżeli kierunki maksymalnego promieniowania poszczególnych wiązek w rzucie na powierzchnię terenu są oddalone od siebie o co najmniej  $D_{-3dB}$ , to każda wiązka może być promieniowana z maksymalnym  $EIRP_{max}$ .



Tab. 2.4.8. Maksymalne poziomy EIRP komórki UMa ( $h_a = 25$  m) dla spełnienia wymagania  $E < 7$  V/m dla wys. 2 m npt

d [m]	r [m]	EIRP [W]	EIRP [dBm]	Tilt [deg]	$D_{-3dB}$ [m]
250	251,1	102 737	80,1	5,3	26,3
240	241,1	94 750	79,8	5,5	25,2
230	231,1	87 089	79,4	5,7	24,2
220	221,2	79 754	79,0	6,0	23,2
210	211,3	72 745	78,6	6,3	22,1
200	201,3	66 062	78,2	6,6	21,1
190	191,4	59 705	77,8	6,9	20,0
180	181,5	53 674	77,3	7,3	19,0
170	171,5	47 969	76,8	7,7	18,0
160	161,6	42 590	76,3	8,2	16,9
150	151,8	37 537	75,7	8,7	15,9
140	141,9	32 810	75,2	9,3	14,8
130	132,0	28 409	74,5	10,0	13,8
120	122,2	24 334	73,9	10,9	12,8
110	112,4	20 585	73,1	11,8	11,8
100	102,6	17 162	72,3	13,0	10,7
90	92,9	14 065	71,5	14,3	9,7
80	83,2	11 294	70,5	16,0	8,7
70	73,7	8 849	69,5	18,2	7,7
60	64,3	6 730	68,3	21,0	6,7
50	55,0	4 937	66,9	24,7	5,8
40	46,1	3470	65,4	29,9	4,8
30	37,8	2 329	63,7	37,5	4,0
20	30,5	1 514	61,8	49,0	3,2
10	25,1	1 025	60,1	66,5	2,6

Tab. 2.4.9. Maksymalne poziomy EIRP komórki UMi ( $h_a = 10$  m) dla spełnienia wymagania  $E < 7$  V/m dla wys. 2 m npt

d [m]	r [m]	EIRP [W]	EIRP [dBm]	Tilt [stopnie]	D <sub>-3dB</sub> [m]
100	100,3	16 404	72,1	13,0	10,5
95	95,3	14 815	71,7	13,6	10,0
90	90,4	13 307	71,2	14,3	9,5
85	85,4	11 881	70,7	15,1	8,9
80	80,4	10 536	70,2	16,0	8,4
75	75,4	9 273	69,7	17,0	7,9
70	70,5	8 091	69,1	18,2	7,4
65	65,5	6 991	68,4	19,5	6,9
60	60,5	5 972	67,8	21,0	6,3
55	55,6	5 035	67,0	22,7	5,8
50	50,6	4 179	66,2	24,7	5,3
45	45,7	3 405	65,3	27,1	4,8
40	40,8	2 712	64,3	29,9	4,3
35	35,9	2 101	63,2	33,3	3,8
30	31,0	1 571	62,0	37,5	3,2
25	26,2	1 123	60,5	42,6	2,7
20	21,5	756	58,8	49,0	2,3
15	17,0	471	56,7	56,9	1,8
10	12,8	267	54,3	66,5	1,3
5	9,4	145	51,6	77,7	1,0

Podsumowując przeprowadzone analizy, można stwierdzić, że przy racjonalnym sterowaniu mocą sygnału dla wiązek śledzących użytkowników w pasmach do 40 GHz istnieje możliwość zachowania standardów ochrony środowiska obowiązujących w Polsce. Powyżej 40 GHz – nawet w najgorszym przypadku – przy pełnej dopuszczalnej mocy i dla punktu obserwacji odległego o 5 m od podstawy anteny, do przekroczenia obowiązującego limitu dopuszczalnego natężenia pola w środowisku będzie zapas ok. 10 dB – będzie to np. margines na pola pochodzące od innych źródeł PEM. Jeżeli przyjmie się, że wiązki nie będą sterowane, a jedynie ustawione tak, żeby maksimum energii trafiało na granicę komórki UMa, to nawet przy maksymalnych wartościach EIRP według FCC

[2016] standardy środowiska będą spełnione dla kanału o  $B = 400$  MHz dla częstotliwości poniżej 40 GHz. Dla komórek UMi (przyjmując, że mikrokomórki pracować będą w pasmach powyżej 40 GHz) do przekroczenia obowiązującego limitu dopuszczalnego natężenia pola w środowisku będzie zapas ok. 30 dB. W praktyce oznacza to możliwość znacznego zagęszczenia sieci w razie potrzeby.

### 3. EFEKTY BIOLOGICZNE DZIAŁANIA EFM I MECHANIZMY TEGO DZIAŁANIA

#### 3.1. MECHANIZMY ODDZIAŁYWANIA EFM

Oddziaływania elektromagnetyczne są zaliczane do fundamentalnych i najbardziej złożonych procesów energetycznych w przyrodzie. Złożoność tę obrazuje konieczność użycia do ich opisu modelu matematycznego, w którym wyróżnia się 2 składowe PEM (elektryczną i magnetyczną), które w dodatku są wielkościami wektorowymi. Jeżeli dodamy do tego fakt, że obiekty materialne mają właściwości elektryczne i magnetyczne (charakteryzowane trzema parametrami dielektrycznymi: przenikalnością elektryczną, przenikalnością magnetyczną i przewodnością elektryczną), otrzymamy bardzo skomplikowane zależności między PEM a obiektem, na który to pole oddziałuje. Okazuje się np., że parametry dielektryczne określonego materiału zależne są od częstotliwości zmian PEM w czasie, a ponadto mogą mieć istotnie różne wartości w różnych kierunkach (co określamy anizotropowością obiektu, charakteryzowanego w takim przypadku macierzą parametrów dielektrycznych, przeciwnie do obiektów izotropowych, które charakteryzuje się wartościami niezależnymi od kierunku). Jeżeli jako „obiekty materialne” potraktujemy również „obiekty biologiczne”, to oczywisty stanie się znaczny stopień skomplikowania oddziaływań elektromagnetycznych w ciele człowieka (np. do biologicznych obiektów o anizotropowych właściwościach dielektrycznych należą m.in. błony komórkowe, białka, DNA, mięśnie, włókna nerwowe).

Podkreślenia wymaga ponadto fakt, że w organizmie człowieka wyróżnia się kilkadziesiąt organów i tkanek o różnej budowie morfologicznej i składzie chemicznym, które charakteryzują parametry dielektryczne o różnych wartościach. Ponadto systematyczne dane naukowe o wartościach tych parametrów dla żywego organizmu i przy oddziaływaniu promieniowania elektromagnetycznego mikrofalowego o częstotliwościach przekraczających 10 GHz są aktualnie przedmiotem intensywnej dyskusji naukowej. Brak porozumienia w tym zakresie, szczególnie w odniesieniu do pasm częstotliwości, w których mają pracować projektowane obecnie systemy radiokomunikacji 5G, jest tak poważny, że w 2018 r. podjęto decyzję o zainicjowaniu europejskiej sieci naukowej specjalizującej się w badaniach z tego zakresu (w ramach programu europejskiej współpracy w dziedzinie nauki i techniki, jako akcja COST MyWave). Znaczna niepewność dotycząca obecnie wartości parametrów dielektrycznych tkanek ludzkich oraz ich zróżnicowania między osobami w różnym wieku, budowie ciała i stanie zdrowia, skutkuje wprost znaczną niepewnością wyników badań dotyczących skutków biofizycznych oddziaływania EFM na człowieka.

Te i inne rozbieżności w badaniach naukowych mają swoje odbicie w przygotowywanych przez różne grupy uczonych rozbieżnych propozycjach limitów określających dopuszczalne działanie PEM. Dla przykładu ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym) w 1998 r. zaproponowała, by dla częstotliwości 2–300 GHz najwyższe dopuszczalne natężenie pola elektrycznego dla populacji generalnej, uśrednione za pewien okres (od 6 min dla 2 GHz do ok. 0,2 min dla 300 GHz), wynosiło 61 V/m, czyli ok. 10 W/m<sup>2</sup> (o podstawach naukowych takiej propozycji szerzej piszemy w rozdziale 4) [ICNIRP, 1998]. Natomiast grupa BioInitiative zaproponowała w 2012 r., na podstawie poziomu najniższych obserwowanych efektów oddziaływania PEM i zasady ostrożności, zaledwie 1 mW/m<sup>2</sup> (ok. 0,6 V/m) jako skumulowaną ekspozycję na częstotliwości radiowe PEM, której nie powinno się przekraczać na zewnątrz budynków [Sage i Carpenter, 2012].

Dziesięć lat temu Shepard i wsp. [2008] dokonali przeglądu możliwych mechanizmów oddziaływania PEM, który wskazywał na to, że złożoność oddziaływań elektromagnetycznych pola o częstotliwości do 10<sup>12</sup> Hz z jonami, atomami i cząsteczkami systemów biologicznych dała początek dużej liczbie ustalonych oraz proponowanych mechanizmów biofizycznych, mających zastosowanie w stosunku do szerokiego zakresu skal czasu i długości fal elektromagnetycznych, amplitud pola, jego modulacji częstotliwości i kształtu przebiegu. Według autorów przeglądu teoria i eksperymenty wskazywały możliwą demodulację przy błonach komórkowych dla częstotliwości < 10 MHz, ale nie dla częstotliwości wyższych. Podobnie na poziomie molekularnym możliwości drgań układów biologicznych wydawały się tak zdominowane przez cząsteczki wody, że pobudzenie przez PEM drgań cząsteczkowych poniżej dalekiej podczerwieni nie było możliwe. Autorzy zdiagnozowali jedynie 2 mechanizmy radiofalowe jako potencjalnie oddziaływujące na układy biologiczne w zwykłych warunkach narażenia. Dla częstotliwości poniżej ok. 150 MHz były to zmiany szybkości reakcji chemicznych prawdopodobnie bazujące na mechanizmie rodnikowym i – dla wszystkich częstotliwości – na ogrzewaniu dielektrycznym oraz rezystancyjnym, które byłyby w stanie podnieść temperaturę eksponowanego układu biologicznego. Przegląd ten sugerował zatem, że jedynym możliwym mechanizmem oddziaływania EFM na układy biologiczne jest oddziaływanie termiczne. W ostatnich latach pojawiły się jednak inne teorie, które rzucają nowe światło na możliwości oddziaływania EFM na struktury komórkowe.

### 3.1.1. WPROWADZENIE

Układy biologiczne nie są układami elektrycznie obojętnymi. Już sama woda, która jest głównym składnikiem każdego organizmu żywego, posiada moment dipolowy i jako taka jest podatna na działanie PEM. Ale niezależnie od oddziaływania na wodę, każdy biologiczny układ można modelowo przedstawić jako szkielet cząsteczkowy zanurzony w roztworze składającym się z wody, jonów i cząsteczek elektrycznie obojętnych. Sam szkielet składa się z cząsteczek, które również mogą być – ze względu na budowę (ładunek, moment elektryczny, moment magnetyczny) – podatne na oddziaływanie PEM. Ekspozycja takiej struktury na PEM może wywoływać ruch (postępowy bądź rotacyjny) wolnych ładunków elektrycznych oraz naprężenia struktur cząsteczkowych, które wchodzi w jego skład.

Pole elektromagnetyczne, rozchodząc się w dowolnym ośrodku (zgodnie z opisem podanym w rozdziale 2) wytraca częściowo energię, która jest przekazywana do ośrodka. Wnikając do danego ośrodka na głębokość  $\delta$  zwaną głębokością wnikania, PEM traci niemal 90% mocy. Generalną zasadą (zainteresowani szczegółami mogą zapoznać się z nimi zamieszczonymi poniżej<sup>1</sup>) jest, iż głębokość wnikania maleje wraz ze wzrostem częstotliwości, co ilustruje ryc. 3.1.1 [Polk, 2006].

---

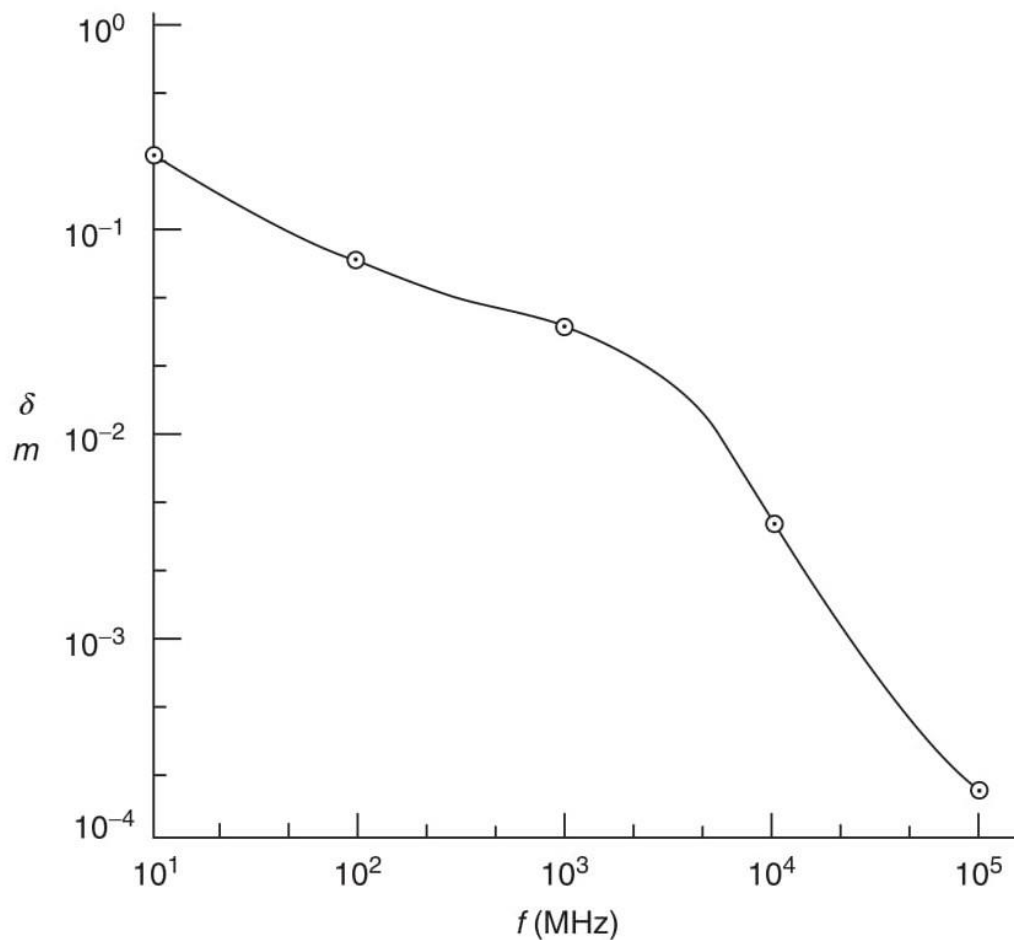
<sup>1</sup> Spadek gęstości mocy promieniowania PEM wynikający z wniknięcia na głębokość  $x$  do ośrodka to:

$$\Delta S = S_0 - S_x = S_0 - S_0 e^{-2ax} = S_0(1 - e^{-2ax})$$

gdzie:  $S_0$  – gęstość mocy na granicy ośrodka,  $S_x$  – gęstość mocy na głębokości  $x$ ,  $a$  – współczynnik absorpcji, który jest zależny od częstości promieniowania  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – częstotliwość PEM) oraz parametrów ośrodka: przewodności ( $\sigma$ ), przenikalności elektrycznej ( $\epsilon\epsilon_0$ ) i przenikalności magnetycznej ( $\mu\mu_0$ ), gdzie  $\epsilon_0$  i  $\mu_0$ , to parametry właściwe dla próżni, zaś  $\epsilon$  i  $\mu$  są względnymi wartościami właściwymi dla ośrodka. Dla tak scharakteryzowanego ośrodka współczynnik absorpcji wynosi:

$$a = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0}\right)^2} - 1 \right)}$$

Dla wysokich częstotliwości, a szczególnie dla EFM, przydatnym parametrem jest głębokość wnikania. Stanowi ona odwrotność współczynnika absorpcji. Wówczas dla  $x = \delta = 1/a$  równanie 2.1.1 przyjmuje postać  $\Delta S = S_0(1 - e^{-2}) \approx 0,865S_0$ , co oznacza, że w ośrodku o grubości  $\delta$  PEM traci niemal 90% mocy. Ponieważ współczynnik absorpcji jest przede wszystkim liniowo zależny od częstotliwości, to w sposób oczywisty  $\delta$  z kolei będzie maleł wraz ze wzrostem częstotliwości.



Ryc. 3.1.1. Głębokość wnikania  $\delta$  (dla której PEM w ośrodku traci ok. 90% energii) w tkance mięśniowej w funkcji częstotliwości [Polk, 2006]

### 3.1.2. NAGRZEWANIE TKANEK

Nagrzewanie tkanek jest najpowszechniej akceptowanym mechanizmem oddziaływania promieniowania mikrofalowego z układami biologicznymi. Zaindukowane w układach biologicznych pola elektryczne i magnetyczne powodują poruszanie się zawieszonych jonów i polarnych cząsteczek, wywołując tym samym przepływ prądów, które zgodnie z podstawowymi regułami fizycznymi wydzielają energię w postaci ciepła. Z drugiej strony PEM powoduje drgania cząsteczek polarnych, które są związane ze sobą i nie mogą się swobodnie poruszać. Drganiom tym zapobiegają siły międzycząsteczkowe struktur, w których cząsteczki te się znajdują. Praca wykonana przeciw oddziaływaniom międzycząsteczkowym przez zaindukowane w układzie PEM jest również w tym wypadku zamieniana na ciepło.

Każdy obiekt, w tym oczywiście układy biologiczne, można scharakteryzować przez szybkość pochłaniania właściwego energii (*Specific Absorption Rate* – SAR) wyrażaną w [W/kg], czyli z definicji:

$$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{d}{dm} \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{\rho \cdot dV} \quad (3.1.1)$$

gdzie: P – moc, W – energia pochłonięta w czasie, t – czas, m – masa, V – objętość,  $\rho$  – gęstość obiektu.

SAR przekłada się bezpośrednio na zmianę temperatury w obiekcie:

$$SAR = C \frac{dT}{dt} \quad (3.1.2)$$

gdzie: C – pojemność cieplna, T – temperatura, t – czas.

Jednocześnie w przypadku absorpcji energii PEM prawdziwe jest równanie:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (3.1.3)$$

gdzie:  $\sigma$  – przewodność,  $\rho$  – gęstość obiektu, E – natężenie pola elektrycznego wewnątrz analizowanego obiektu [Poljak i Brebbia, 2005].

Jak wynika z wzorów (3.1.2) i (3.1.3), PEM w obiekcie biologicznym będzie wpływać na wzrost jego temperatury.

Organizm ludzki posiada jednak, jak wszystkie organizmy stałocieplne, wbudowane mechanizmy termoregulacyjne. Bez nich już sama energia wytwarzana przez podstawową przemianę materii (PPM) powodowałaby wzrost temperatury ciała. Zgodnie z równaniem Mifflin-St. Jeor, opisującym minimalne zapotrzebowanie organizmu na energię, czyli ilość energii wytwarzaną przez PPM w zależności od masy, wzrostu i wieku, waha się ona od ok. 1000 do 2000 kcal na dobę, co odpowiada mocy ok. 50–100 W. Wytwarzana w tym tempie energia, gdyby nie była rozpraszana, powodowałaby ogrzewanie organizmu z prędkością ok. 0,7–1,3°C/h [Leondes, 2002]. Przyjmując nawet, że większość PPM jest wykorzystywana przez endoenergetyczne reakcje zachodzące w organizmie i zaledwie 5% jest rozpraszane w postaci ciepła, i tak skutkowałoby to przyrostem temperatury o ok. 1–1,5°C na dobę. Również przyrost temperatury wynikający z pochłonięcia energii elektromagnetycznej może być zanedbywalnie mały i w całości kompensowany przez mechanizmy termoregulacyjne. Jednak przy odpowiednio dużej energii PEM pochłoniętej w niewielkim czasie, przyrost temperatury wynikający z ekspozycji na PEM może być niemożliwy do skompensowania przez układy termoregulacyjne i skutkować faktycznym wzrostem przyrostu temperatury. Doświadczalnie stwierdzono, że 30-minutowa ekspozycja, przy której SAR dla całego



ciała wynosił ok. 4 W/kg, spowodowała wzrost temperatury o ok. 1°C [Shellock i Crues, 1987; Magin i wsp., 1992]. Dało to podstawę do wyznaczenia większości wytycznych ekspozycyjnych oraz przepisów ograniczających ekspozycję, które bazują na uznaniu wyłącznie efektów termicznych [ICNIRP, 1998].

Wszystkie efekty bezpośrednio i pośrednio związane ze wzrostem temperatury tkanek wynikającym z oddziaływania PEM nazywane są efektami termicznymi. Należą do nich m.in. zmiana szybkości reakcji chemicznych na poziomie komórkowym [Levine, 2005], zmiany w procesie syntezy białek i wiązania białek do błony komórkowej [Park i Seo, 2015], zmiany lepkości płynów ustrojowych, rozpuszczalności gazów w płynach ustrojowych, ciepła właściwego tkanek, współczynników dyfuzji, przewodności elektrycznej tkanek [Haynie, 2008]. Wzrost temperatury prowadzi również do rozszerzalności cieplnej układu, a gwałtowny wzrost temperatury może wywołać powstawanie fal akustycznych [Lin i wsp., 2007].

W przypadku ekspozycji człowieka na EFM efekty termiczne, jeśli w ogóle będą występować, ze względu na głębokość wnikania PEM dla częstotliwości właściwych dla EFM (patrz tabela 3.1.1) zlokalizowane będą jedynie w najbardziej zewnętrznych warstwach organizmu – naskórku i skórze właściwej oraz oku, co potwierdzają dotychczasowe publikacje na ten temat. Na przykład Laakso i wsp. [2017] szacują, że przy ekspozycji na PEM o częstotliwości 6–100 GHz i gęstości mocy 1000 W/m<sup>2</sup> (która z pewnością nie wystąpi dla żadnego elementu sieci 5G) wzrost temperatury skóry twarzy eksponowanej impulsami o długości 10 s dla powierzchni skóry nie będzie przekraczał 4°C i 0,5°C dla głębokości 4 mm. Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w rozdziale 2.4.4 gęstości mocy, których można się spodziewać od urządzeń sieci 5G przy założeniu dotrzymania polskich przepisów środowiskowych, są tak niewielkie, że w praktyce nie wywołają wzrostu temperatury organizmu.

Tab. 3.1.1. Głębokość wnikania PEM dla wybranych częstotliwości [Rappaport i wsp., 2015; Durney i wsp., 1986]

Częstotliwość PEM [GHz]	Głębokość wnikania, czyli 10-krotnego zmniejszenia gęstości mocy promieniowania wnikającego do organizmu [mm]
15	2–3,3
20	1,6
100	0,45–0,6

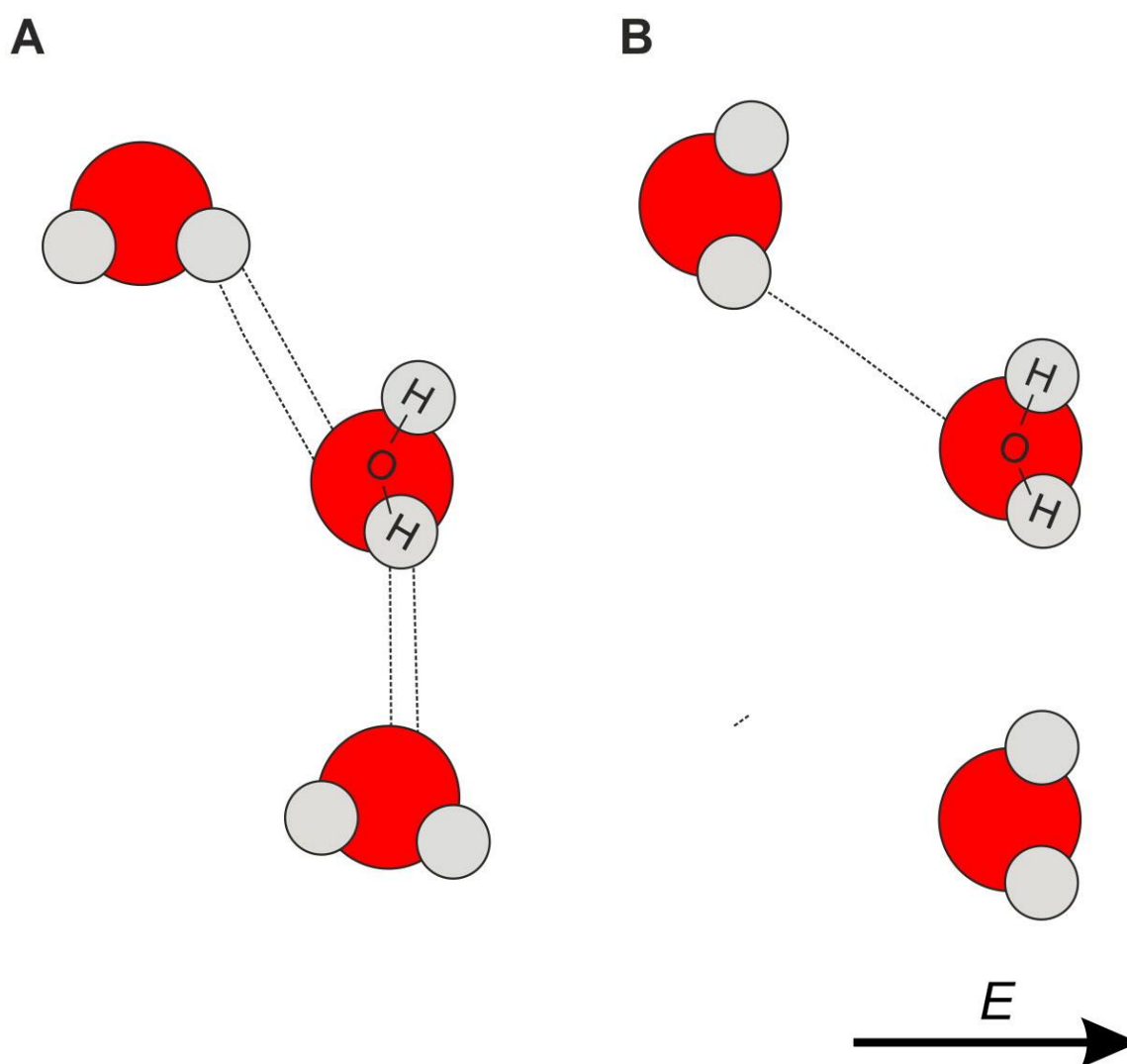
Z pewnością jednak nie wszystkie obserwowane efekty oddziaływania EFM da się wyjaśnić ich oddziaływaniem termicznym.

### 3.1.3. INNE MECHANIZMY ODDZIAŁYWANIA EFM

Wykazano, że ekspozycja na EFM może wywoływać zmiany w funkcjonowaniu błony komórkowej, komunikacji komórkowej, wpływać na metabolizm komórkowy, na aktywację protoonkogenów, a także wyzwać produkcję białek stresowych.

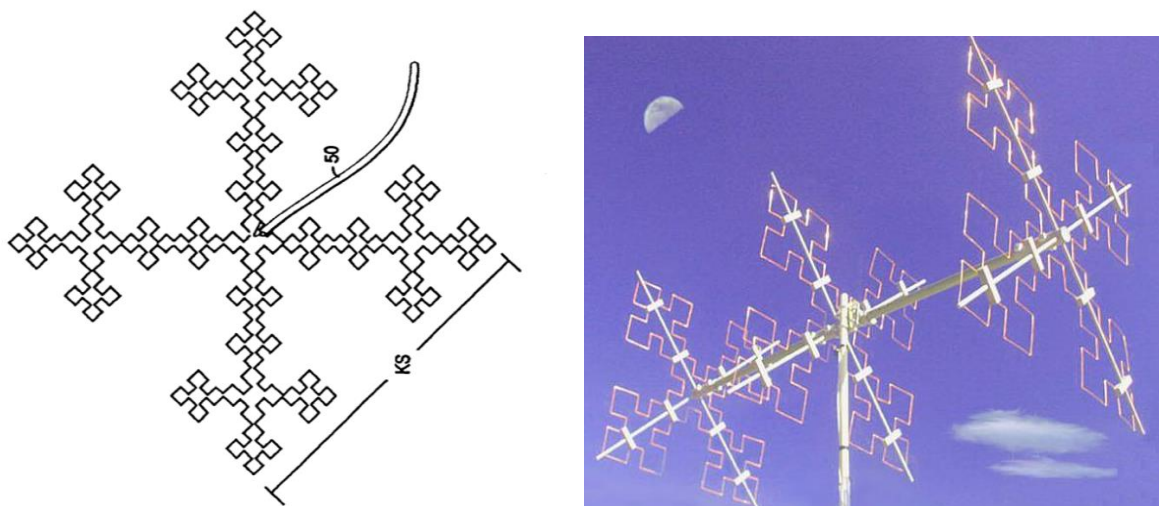
Le Dréan i wsp. [2013] wskazują na możliwość zakłócania przez EFM orientacji w błonach cząsteczek naładowanych i dipolarnych, która mogłaby powodować m.in. zmiany przepuszczalności błony nerwowej i wpływać na sygnał elektryczny przekazywany do reszty ciała. Tak naprawdę nie są jednak znane mechanizmy fizyczne, które mogłyby powodować reorientację dużych cząsteczek dipolarnych w polach o tak wielkich częstotliwościach. Powszechnie przyjmowano, że efekt taki może zachodzić w PEM o co najwyżej megahercowych częstotliwościach, jednak ostatnio pojawiła się interesująca teoria, mogąca tłumaczyć wiele opisanych oddziaływań PEM i EFM. Hinrikus i wsp. [2018] opublikowali pracę, która wskazuje, że rotacja cząsteczek dipolarnych (m.in. wody) powoduje polaryzację ośrodka dielektrycznego i restrukturyzację wiązań wodorowych między tymi cząsteczkami. Schemat osłabiania wiązań wodorowych przedstawiono na ryc. 3.1.2. Osłabione wiązania wodorowe zmniejszają lepkość i zwiększają dyfuzję w stałej temperaturze. Wszystkie etapy proponowanego modelu nie mają krytycznych ograniczeń częstotliwościowych dotyczących promieniowania mikrofalowego i zostały potwierdzone przez teorię PEM i/lub opublikowane wyniki eksperymentalne. Synchroniczny skumulowany wpływ spójnego mikrofalowego pola elektrycznego umożliwia efekt wywołany polem, mimo że natężenia pola są znacznie słabsze niż pola międzycząsteczkowe. Rotacja cząsteczek dipolarnych powoduje przekształcenie wiązań wodorowych między cząsteczkami, mimo że energia promieniowania mikrofalowego jest znacznie mniejsza niż energia wiązania. Skumulowany wpływ spójnego pola mikrofalowego w ośrodku został przekonująco potwierdzony przez mierzalną przenikalność dielektryczną ośrodka. Opisany mechanizm oddziaływania PEM potwierdza, że charakter efektu różni się od efektu cieplnego. Dlatego ekspozycja na promieniowanie mikrofalowe może wywołać w obiektach biologicznych i materiałach różnorodne skutki w sposób odmienny od efektów obserwowanych w przypadku konwencjonalnego ogrzewania.

Należy zwrócić również uwagę na opisywane w literaturze rezonansowe efekty oddziaływania EFM o precyzyjnie określonych częstotliwościach z pasma 40 i 50 GHz na DNA, choć autorzy prac nie określają dokładnie charakteru tego rezonansu. Na przykład Belayev i wsp. [1992] wskazują na tego typu oddziaływanie EFM o częstotliwościach 51,55 GHz i 41,32 GHz na DNA i to przy ekspozycji na pola rzędu mikrowatów na metr kwadratowy. Wydaje się, że wyjaśnienie tych mechanizmów rezonansowych można znaleźć w pracach Blank i Goodman [2011]. Wskazują oni na podobieństwo upakowanej struktury DNA do anten fraktalnych. Ukształtowanie przewodnika w skomplikowane krzywe fraktalne wypełniające przestrzeń powoduje wydłużenie drogi prądów, dzięki czemu miniaturowa antena zachowuje się jak o wiele większa, o tradycyjnej konstrukcji. Cechą charakterystyczną takich anten jest szerokopasmowość.



Ryc. 3.1.2. Schemat wiązań wodorowych między cząsteczkami wody: A – bez pola elektrycznego, siły wiązania między cząsteczkami są silne (podwójne linie); B – w zewnętrznym polu elektrycznym cząsteczki zostały obrócone, siły wiązania między cząsteczkami są słabsze (pojedyncze linie) lub zerwane [Hinrikus i wsp., 2018]

Przykład takiej anteny przedstawiono na ryc. 3.1.3. Ciasne upakowanie nici DNA powoduje, że może ona wchodzić w rezonans również z pozornie całkowicie nierezonansowymi częstotliwościami, w tym z EFM, gdyż niemal ciągła chmura wolnych elektronów wzdłuż obu stron spirali utworzonej przez pary zasad zapewnia ścieżkę przewodzenia w odpowiedzi na zewnętrzne PEM. Zmiany chemiczne wywołane przez reakcję przeniesienia elektronu mogą być związane z uszkodzeniami DNA [Blank i Goodman, 2011]. Jest możliwe, że tego typu efekty rezonansowe mogą odpowiadać za nietermiczną aktywację białek stresowych [Blank, 2007].

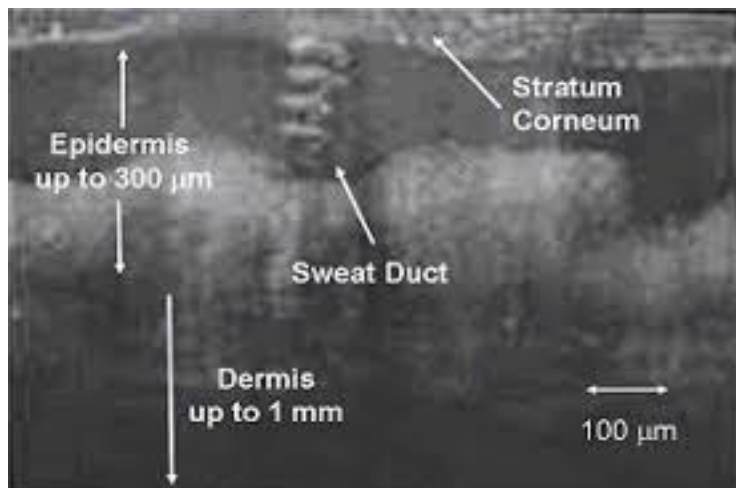


Ryc. 3.1.3. Przykład anteny fraktalnej. Schemat i rzeczywiste wykonanie

W literaturze są również raportowane efekty oddziaływania EFM, których nie daje się bezpośrednio połączyć z opisanymi wcześniej mechanizmami ich funkcjonowania. I tak EFM są stosowane jako czynnik przeciwbólowy. Radziewsky i wsp. [2000, 2001, 2008] oraz Ziskin [2013] jako ewentualne mechanizmy stojące za tym oddziaływaniem wskazują bezpośrednią aktywację komórek skóry (i/lub mastocytów), powodujących wydzielanie cząsteczek czynników sygnałowych w ogólnym krążeniu krwi lub stymulację obwodowego układu nerwowego, który z kolei aktywuje centralny układ nerwowy i indukuje wydzielanie peptydów opioidowych.

Obecnie próbuje się projektować i konstruować wojskowe systemy obozwardniające, wykorzystujące częstotliwość 95 GHz [Gross, 2010]. Wydaje się, że zakres MMW 95 GHz wpływa bezpośrednio na nocyceptory skóry i działa jako bodziec pobudzający je bez ogrzewania i uszkodzeń termicznych [LeVine, 2009]. Mechanizm tego oddziaływania również nie został w pełni wyjaśniony, ale podejrzewa się oddziaływanie EFM na gruczoły potowe. Feldman i wsp. [2008, 2009] wykazali, że kanały potowe w ludzkiej skórze są spiralnie ukształtowanymi tunelami, wypełnionymi przewodzącym roztworem wodnym (ryc. 3.1.4). Ich badania wskazują, że kanały potowe w skórze mogą zachowywać się jak anteny i odpowiedzieć na odebrane EFM.

Z wykonanych przez ten zespół obliczeń wynika, że uwzględnienie w modelowaniu skóry kanałów potowych może zwiększyć lokalne pochłanianie energii nawet o 25–30 dB, czyli nawet 1000-krotnie [Betzalel i wsp., 2017]. Jest to całkowicie spójne, gdyż całkowita długość kanału potowego wynosi ok. 1–1,5 mm i odpowiada długości EFM.



Ryc. 3.1.4. Zdjęcie z tomografii komputerowej ukazujące pojedynczy kanał potowy zlokalizowany w warstwie naskórka [Feldman i wsp., 2008]

### 3.2. SKUTKI BIOLOGICZNE I ZDROWOTNE

Liczba prac naukowych dotyczących biologicznego działania EFM stanowi niewielką część artykułów opisujących oddziaływanie całego spektrum PEM. Według bazy PubMed stanowią one ok. 2,9% wszystkich opracowań dotyczących PEM (762 vs 26 166). Podobna liczba prac została umieszczona w specjalistycznej bazie „EMF research database”, tworzonej w ramach projektu WHO pod nazwą EMF-Portal (3,3%). Badania te (zwłaszcza współczesne) są tak nieliczne, że żadne autorytatywne gremium naukowe, np. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) nie zdecydowało się na ich naukową analizę [SCENIHR, 2015]. Należy jednak spodziewać się, że w najbliższych latach w związku z rozpoczęciem wdrażania systemu 5G telefonii komórkowej liczba badań zdecydowanie się powiększy.

Ze względu na głębokość wnikania EFM (patrz rozdz. 3.1) narządami docelowego ich działania są skóra i oko. Nie oznacza to oczywiście, że można uznać EFM za mniej szkodliwe niż PEM niższych częstotliwości, wnikające w głąb ciała człowieka i sięgające narządów wewnętrznych. Znacząca rola skóry dla organizmu ludzkiego znana jest od dawna – każde zaburzenie jej funkcjonowania może istotnie naruszać homeostazę ustroju. Z biofizycznego punktu widzenia wystąpienie nieprawidłowości w funkcjonowaniu skóry jest wysoce prawdopodobne – pochłonięcie całej energii niesionej przez EFM w tak małej grubości tkanki nie może być biologicznie obojętne.

Efekty działania każdego czynnika szkodliwego można podzielić na ostre (występujące zaraz po ekspozycji) i odległe. Ze względu na niewielki zakres zastosowań EFM dotychczas nie prowadzono badań dotyczących ewentualnych odległych skutków zdrowotnych działania fal EFM, a wiedza na temat efektów ostrych pochodzi głównie z badań eksperymentalnych *in vitro* i *in vivo* na zwierzętach – badania przeprowadzone u ludzi są nieliczne.

Większość prac pochodzi z krajów byłego Związku Radzieckiego i dotyczy kontrowersyjnych z naukowego punktu widzenia zastosowań EFM w terapii medycznej. W opublikowanym w 1998 r. przeglądzie badań Pakhomov [1998] zwraca uwagę na „nadprodukcję” prac ZSRR w tej dziedzinie w stosunku do reszty świata. Baza EMF Database wersja 3.0 [1997] wymienia 463 publikacje z ZSRR o EFM i powiązanych tematów, a jedynie 261 publikacji pochodzących z innych krajów. Ponadto badaniom radzieckim nad zastosowaniem EFM w terapii medycznej zarzucano liczne braki metodologiczne (np. brak ślepych prób, małą liczebność grup badanych), czy brak teorii wyjaśniającej obserwowane efekty, a także niejednoznaczność wskazań do leczenia. Spowodowało to, że metoda ta jest w innych krajach praktycznie nieznaną.

Jednak niektóre z obserwacji z badań prowadzonych w byłym Związku Radzieckim zostały potwierdzone przy zastosowaniu nowoczesnych metod analizy w znacznie nowszych pracach dotyczących możliwego działania PEM [np. Grigoriev i wsp., 2010].

W naszym opracowaniu przedstawiliśmy istniejące dane literaturowe na temat oddziaływania biologicznego EFM, skupiając się na ekspozycjach, jakich spodziewamy się w otoczeniu urządzeń systemu 5G. Uwzględniliśmy także najważniejsze efekty ostre powodowane ekspozycją na EFM wywołującą efekt termiczny.

### 3.2.1. DZIAŁANIE EFM NA SKÓRĘ

Grubość skóry człowieka jest różna w różnych częściach ciała, np. na czaszce ma ok. 1,3 mm, a na plecach – ok. 4 mm [Snyder i wsp., 1975]. Skóra składa się z 3 podstawowych warstw – naskórka (ok. 0,5 mm), skóry właściwej, której grubość wynosi ok. 2 mm i warstwy podskórnej, której grubość jest zmienna i zależy od wielu czynników. Naskórek składa się z 5 warstw (warstwa rogowa, jasna, ziarnista, kolczysta i podstawna). W skórze znajdują się także zakończenia nerwów obwodowych.

Dla pochłaniania energii EFM przez skórę duże znaczenie ma zawartość wody w tkance. Stanowi ona 15–40% warstwy rogowej naskórka i aż 70–80% pozostałych warstw naskórka i skóry właściwej. Tak duża zawartość wody w tych tkankach powoduje w nich znaczną absorpcję EFM. Z badań modelowych i eksperymentalnych wynika, że przenikalność elektryczna skóry zmniejsza

się wraz ze wzrostem częstotliwości EFM, natomiast przewodność wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości [Wu i wsp., 2015]. Ze względu na różną grubość poszczególnych warstw skóry w różnych częściach ciała są one w różnym stopniu wrażliwe na działanie EFM.

Dotychczas prowadzone były przede wszystkim prace nad efektem termicznym pochłaniania energii w skórze. Zakłada się, że ze względu na przenikanie EFM na niewielką głębokość (ok. 1–2 mm) efekt ten jest związany ze wzrostem temperatury skóry, a nawet z jej poparzeniem. Z badań przeprowadzonych zarówno u zwierząt, jak i u ludzi wynika, że uszkodzenia termiczne skóry przy zastosowaniu klasycznego źródła energii cieplnej, jakim jest gorący obiekt, powstają:

- po 2 godz. przy temperaturze 45°C,
- po 15 min przy temperaturze 48°C,
- po 30 sek. przy temperaturze 53°C.

Całkowita martwica naskórka następuje przy kontakcie z gorącym obiektem:

- przez 18 min przy temperaturze 48°C,
- przez 4 min przy temperaturze 51°C,
- przez 5 sek. przy temperaturze 60°C [Moritz i Henriques, 1947].

W badaniach Jauchem i wsp. [2016] stwierdzono, że przy ok. 30-minutowej ekspozycji skóry na EFM o częstotliwości 35 GHz i gęstości mocy 750 W/m<sup>2</sup> jej temperatura wzrastała do ok. 46°C, ale ekspozycja nie wywoływała oparzeń. Bardzo istotna dla tego eksperymentu jest obserwacja, że w przypadku ekspozycji na EFM konsekwencje w postaci udaru cieplnego występowały już przy temperaturze wewnętrznej 40°C, a podczas ogrzewania tradycyjnym źródłem – przy temperaturze 41,5°C. Przyczyny tej różnicy nie zostały dotychczas wyjaśnione.

Ze wzrostem temperatury skóry związane jest także odczuwanie bólu. Blick i wsp. [1997] przeprowadzili eksperyment wśród 15 ochotników, którzy byli ekspozycyjni na EFM o częstotliwości 35 i 94 GHz oraz zróżnicowanej gęstości mocy. Najniższa intensywność EFM dla każdej częstotliwości była ustawiona poniżej poziomu odczuwania bólu przez osobę najbardziej wrażliwą, a najwyższa – powyżej granicy dla osoby najmniej wrażliwej. Kolejność emitowanych bodźców o różnej gęstości mocy była losowa. Czas trwania pojedynczego bodźca (ekspozycji) wynosił 1 s, przerwa – 1 min. Dla częstotliwości 35 GHz (głębokość wnikania – 0,8 mm) granica bólu wynosiła 88±13 W/m<sup>2</sup>, natomiast dla częstotliwości 94 GHz (głębokość wnikania – 0,4 mm) – zaledwie 4,5±0,6 W/m<sup>2</sup> (za [Ryan i wsp., 2000]). W takich warunkach temperatura skóry wynosiła ok. 45°C, co jest progiem bólu w przypadku działania tradycyjnego źródła ciepła ([Hardy i wsp., 1952], za [Ryan i wsp., 2000]). Z uwagi na fakt, że granica odczuwania bólu występuje dla temperatury znacznie niższej niż ta, która powoduje uszkodzenie skóry, człowiek może uniknąć

konsekwencji ekspozycji na EFM o dużej intensywności (poprzez usunięcie się z zasięgu promieniowania) znacznie wcześniej, niż nastąpi poparzenie skóry [Lawrence i Bull, 1976], pod warunkiem że jest to możliwe. Nie ma publikowanych danych na temat ekspozycji na EFM u ludzi, które spowodowałyby poparzenia. Osobnym zagadnieniem jest prawdopodobieństwo przekształcenia się obecnych na skórze blizn lub bliznowców (keloidy) w zmiany nowotworowe w wyniku ekspozycji na EFM. Na ten temat również brakuje danych [Ryan i wsp., 2000].

Analizując potencjalne mechanizmy prowadzące do efektów biologicznych ekspozycji na EFM, należy pamiętać, że w pierwszej kolejności oddziałują one na błony biologiczne, zarówno komórkowe, jak i organelli komórkowych. Błony biologiczne są strukturami, które działają w żywych organizmach jako selektywnie przepuszczalna bariera. Zbudowane są zazwyczaj z dwuwarstwy fosfolipidowej z wbudowanymi białkami wykorzystywanymi w komunikacji z otaczającym środowiskiem i w transporcie transbłonowym m.in. jonów. W szeregu badań pokazano, że EFM mogą wpływać na własności błon biologicznych. Rajmundo-Orlando i wsp. [2007, 2009] wykazali, że ekspozycja na pola 53,3 lub 130 GHz ( $73 \text{ W/m}^2$ ) zmodyfikowała kształt i zwiększyła przepuszczalność pęcherzyków liposomalnych. Podobne wyniki uzyskali Cosentino i wsp. [2013], którzy badali wpływ EFM o częstotliwości 52–72 GHz i gęstości mocy padającej  $0,035\text{--}0,10 \text{ W/m}^2$  na właściwości fizykochemiczne błon, stosując pęcherzyki liposomalne. Zwiększenie przepuszczalności błony lipidowej pod wpływem promieniowania EFM o częstotliwości 53,37 GHz i o gęstości mocy padającej  $1 \text{ W/m}^2$  zaobserwowali Di Donato i wsp. [2012]. Jednak nie wszystkie prace przedstawiają tak jednoznaczne wyniki. Zhadobov i wsp. [2006] dla ekspozycji na pole 60 GHz o poziomach, jakie mogą występować w systemach komunikacji bezprzewodowej ( $9 \text{ W/m}^2$ ), stwierdzili, że krótkotrwałe ekspozycje na EFM o niskiej gęstości mocy powodują zmiany monowarstwy fosfolipidowej. Działanie to nie jest jednak wystarczająco silne, aby zakłócało organizację funkcjonowanie dwuwarstwy fosfolipidowej w błonach.

### 3.2.2. DZIAŁANIE EFM NA OCZY

Szczególnie wrażliwe na działanie EFM wydają się być oczy. Efekt zależy od częstotliwości EFM, czasu trwania i intensywności ekspozycji, od głębokości wnikania i możliwości odprowadzania nadmiaru ciepła. Mechanizm odprowadzania ciepła jest w przypadku oczu znacznie mniej efektywny w porównaniu z innymi obszarami ciała i odbywa się dzięki przepływowi krwi przez siatkówkę, przewodzenie ciepła w twardówce oraz poprzez konwekcję i promieniowanie z powierzchni rogówki. W wyniku wielu badań ustalił się pogląd, że uszkodzenia oka mają



charakter termiczny. Unikanie efektu termicznego związanego z ekspozycją może odbywać się dzięki mruganiu i zamykaniu powiek oraz odwracaniu głowy od źródła promieniowania.

Uszkodzenie warstwy nabłonka rogówki podlega regeneracji w okresie 24–48 godz., natomiast uszkodzenie istoty właściwej rogówki może prowadzić do jej zmętnienia. Jest bardzo mało badań na ten temat i były one prowadzone tylko na zwierzętach. Na podstawie ich wyników ustalono, że uszkodzenia oka mają charakter termiczny. Energia związana z ekspozycją kumulowana jest w powierzchniowych warstwach nabłonka rogówki. Rosenthal i wsp. [1976], Chafin i wsp. [1998] oraz Kojima i wsp. [2009] wykazali, że obrzęk lub uszkodzenie rogówki oczu występowały przy ekspozycji na EFM o dużym natężeniu ( $400 \text{ W/m}^2$ ,  $2000 \text{ W/m}^2$ ,  $4750 \text{ W/m}^2$ ). Natomiast ekspozycja, nawet 8-godzinna, na EFM o gęstości mocy padającej  $100 \text{ W/m}^2$ , nie powodowała żadnych zmian [Kues i wsp., 1999].

Kojima i wsp. [2018] wykazali na podstawie badań eksperymentalnych na królikach, że stopień uszkodzenia oczu był niezależny od częstotliwości EFM – natomiast uszkodzenie rogówki zwiększało się wraz z czasem trwania ekspozycji. Nie stwierdzono korelacji między temperaturą rogówki a stopniem jej uszkodzenia. Zmiany te ustępowały po 1–2 dniach. Autorzy stwierdzili, że uszkodzeniu rogówki sprzyjało jej przesuszenie (powieki zwierząt były unieruchomione). Należy przyjąć, że u ludzi nie doszłoby prawdopodobnie do uszkodzenia rogówki przy ekspozycji na EFM ze względu na funkcję mrugania, która powoduje nawilżanie gałki ocznej filmem łzowym.

Istnieją jednak nieliczne prace, których wyniki wskazują na możliwość występowania w oku efektu nietermicznego. Prost i wsp. [1994] przedstawili wyniki badań prowadzonych u 8 szczurów eksponowanych na EFM o częstotliwości 53 GHz i gęstości mocy padającej  $100 \text{ W/m}^2$ , niepowodującej mierzalnego efektu termicznego (3 cykle ekspozycji w odstępie 2 tygodni – 1 cykl obejmował 10 dni, a ekspozycja każdego dnia wynosiła 20 min). Przechodzenie światła przez izolowane soczewki było mierzone spektrofotometrycznie. Autorzy stwierdzili, że przenikanie przez soczewki było znacznie zmniejszone (ok. 33%). Na podstawie wyników tych badań wnioskowali, że ekspozycja na EFM może indukować zmiany w soczewce, predysponując ją do rozwoju zaćmy. Badanie ma jednak ograniczone znaczenie ze względu na małą liczebność grupy badanej i brak udokumentowania stawianej hipotezy.

### 3.2.3. INNE, NIETERMICZNE SKUTKI DZIAŁANIA EFM

Z badań modelowych wynika, że głębokość wnikania w warstwę skóry dla EFM o częstotliwości 35 GHz wynosi 0,75 mm, a dla częstotliwości 94 GHz – 0,35 mm [Gandhi i Riaz, 1986]. Można by zatem uznać, że ekspozycja może spowodować uszkodzenie tylko warstw powierzchniowych.

Jednak opisywano pojedyncze przypadki konsekwencji związanych z ekspozycją na wysokie poziomy EFM, które obejmowały zaburzenia ciśnienia tętniczego, bezsenność, bóle głowy i niestabilność emocjonalną po ekspozycji na PEM o częstotliwości 8–12 GHz (zbliżonych do interesującego nas zakresu) [Forman i wsp., 1982]. Castillo i Quencer [1998] opublikowali przypadek 5-minutowej ekspozycji człowieka na pole emitowane przez radar wojskowy, natomiast Williams i Webb [1980] opisali przypadek dwóch pilotów eksponowanych na EFM o częstotliwości powyżej 10 GHz emitowane przez wojskowy radar, o natężeniu 38 razy przekraczającym obowiązującą w wojsku normę, u których wystąpiły stany lękowe i nadciśnienie.

Jauchem i wsp. w kilku eksperymentach badali reakcję układu krążenia (częstość skurczów serca, ciśnienie tętnicze) podczas ekspozycji na EFM o częstotliwości 10 GHz [2000], 35 GHz [2016] i 94 GHz [1999]. Ekspozycja powodowała znaczny gwałtowny wzrost temperatury skóry, ale umiarkowany wzrost temperatury wewnętrznej. Należy zaznaczyć, że mechanizm tego zjawiska nie został zbadany i wyjaśniony przez autorów. Stawiają oni hipotezę, że dysproporcja między temperaturą skóry a temperaturą wewnętrzną może być przyczyną niewydolności krążenia, a w konsekwencji zgonu [Jauchem i wsp., 1999]. Podobne wyniki osiągnęli Millenbagh i wsp. [2006], którzy porównywali reakcje układu krążenia u myszy eksponowanych na EFM o częstotliwości 35 GHz i 94 GHz, o gęstości mocy 750 i 900 W/m<sup>2</sup> dla każdej częstotliwości oraz na promieniowanie podczerwone (IR) o temperaturze 42°C i 43°C. Taka temperatura otoczenia powodowała podobny wzrost temperatury rektalnej, jak ekspozycja na EFM o wymienionych wyżej parametrach. W bardzo dobrze zaplanowanym i przeprowadzonym eksperymencie autorzy stwierdzili, że wzrost temperatury skóry podczas wszystkich ekspozycji na EFM był istotnie większy niż wzrost temperatury rektalnej, natomiast różnicy takiej nie stwierdzono przy ekspozycji na podczerwień. Autorzy podkreślają, że w każdym przypadku ekspozycji na EFM występowały większe i bardziej gwałtowne zmiany temperatury skóry niż podczas ogrzewania podczerwiecią (IR), natomiast nie było istotnych różnic w temperaturze wewnętrznej (rektalnej). W kolejnym eksperymencie przeprowadzonym przez Jauchem i wsp. [2016] eksponowano myszy (16 zwierząt) na EFM o częstotliwości 35 GHz i bardzo wysokiej gęstości mocy 750 W/m<sup>2</sup>. Autorzy zauważyli, że zgon zwierząt związany z ekspozycją na EFM następował przy temperaturze wewnętrznej niższej (ok. 40°C) w porównaniu do temperatury wywołującej zgon przy tradycyjnym ogrzewaniu (41,5°C). W badaniu histopatologicznym nie stwierdzono istotnych zmian w narządach wewnętrznych eksponowanych zwierząt.

Mechanizm obserwowanych zmian nie został wyjaśniony. Autorzy spekulują, że ekspozycja na EFM wywołuje głęboką hipotensję (spadek ciśnienia tętniczego), związaną z przesunięciem znacznej

objętości krwi z krążenia centralnego do krążenia obwodowego, czego konsekwencją jest zgon. W omówionych badaniach stosowane były EFM o bardzo dużej gęstości mocy, które powodowały nasilony efekt termiczny. Niepokojący jest jednak fakt, że reakcje fizjologiczne na ekspozycję na EFM, mimo że związane były z efektem termicznym, przebiegały inaczej niż przy ogrzewaniu za pomocą tradycyjnego źródła ciepła (IR).

Badania na zwierzętach wykazały też występowanie zaburzeń neurologicznych w postaci zmian w EEG [Xie i wsp., 2011]. Autorzy nie zaobserwowali istotnych zmian w EEG podczas ekspozycji na pole o intensywności  $5000 \text{ W/m}^2$ , kiedy temperatura skóry nie przekraczała  $41^\circ\text{C}$ . Natomiast w zapisach EEG podczas ekspozycji wyższych, ale niepowodujących poparzenia, stwierdzono wiele nieprawidłowości i pobudzeń iglicopodobnych, przypominających zapis pracy mózgu w napadzie padaczkowym. Reakcja stresowa, stwierdzana w EEG, rozpoczynała się w okresie 1–17 s ekspozycji i stawała się bardzo gwałtowna, gdy temperatura skóry wzrastała o  $10^\circ\text{C}$ , dochodząc do granicy odczuwania bólu, tzn. przy intensywności pola  $35000\text{--}75000 \text{ W/m}^2$ . Obserwowane zaburzenia w zapisie EEG nasilały się wraz ze wzrastającą intensywnością pola: podczas kolejnych ekspozycji gwałtowne reakcje pojawiały się wcześniej i trwały dłużej. Różnice w zapisie EEG w stosunku do zapisu EEG przed ekspozycją dochodziły do 500%.

Przeciwbólowe działanie EFM o różnych częstotliwościach było z kolei badane przez Partyła i wsp. [2017] za pomocą testu oziębieniowego, przeprowadzonego u 20 zdrowych mężczyzn. Test polegał na zanurzeniu dłoni w wodzie o temperaturze  $1^\circ\text{C}$  (*cold pressor test* – CPT) i ocenie czasu od momentu zanurzenia do wyciągnięcia ręki z wody z powodu silnego bólu. Każdy ochotnik przechodził próbę 6-krotnie w odstępach co najmniej 24 godz. Test CPT wykonywano w warunkach kontrolnych i podczas ekspozycji na EMF  $42,25 \text{ GHz}$  i gęstości mocy  $172 \text{ W/m}^2$ . Osoby badane i badające nie wiedziały, jakie warunki były w danym momencie stosowane (podwójnie ślepa próba). Na podstawie wyników badania stwierdzono, że ekspozycja na EFM o częstotliwości  $42,25 \text{ GHz}$  powodowała istotne podwyższenie progu bólu – o 23–25%. W momencie największego nasilenia bólu pomiar ciśnienia rozkurczowego wskazywał wyższe wartości podczas ekspozycji na EFM  $42,25 \text{ GHz}$  ( $84 \pm 9 \text{ mm Hg}$ ) w porównaniu do wyników pomiaru ciśnienia w warunkach kontrolnych ( $68 \pm 8 \text{ mm Hg}$ ). Autorzy nie wyjaśnili mechanizmu tego zjawiska. Ponieważ obserwowano różnice w reakcji organizmu na ogrzewanie tradycyjnym źródłem ciepła i ogrzewanie przy pomocy EFM, można domniemywać, że mechanizmy tych reakcji są różne – istnieje specyficzne działanie EFM, które być może zachodzi również dla ekspozycji na pola o wartościach nietermicznych.

Wobec powyższych spostrzeżeń naszym zdaniem na szczególną uwagę badawczą zasługują skutki wpływu EFM na układ krążenia i układ nerwowy, które są zapewne związane z wpływem takich pól na błony pobudliwe, w tym na działające w nich pompy jonowe. Li i wsp. [2014] stwierdzili, że pod wpływem ekspozycji na EFM o częstotliwości 30–40 GHz i gęstości mocy  $40 \text{ W/m}^2$  przez 30 lub 60 min następuje zwiększenie proliferacji chondrocytów (co zostało opisane w dalszej części Raportu). Autorzy postulują, że jest to związane z wpływem ekspozycji na potencjały kanału  $\text{K}^+$  w błonach tych komórek. O wpływie EFM na pompy jonowe świadczą również wyniki badań Brovkovicha i wsp [1991]. Badali oni wpływ EFM o częstotliwości 61 GHz i gęstości mocy ok.  $40 \text{ W/m}^2$  na pompę  $^{++}\text{Ca}$  retikulum endoplazmatycznego w homogenatach mięśni szczurów. Stwierdzili, że taka ekspozycja zwiększa szybkość wychwytu  $^{++}\text{Ca}$  przez siateczkę sarkoplazmatyczną w sercu i homogenacie mięśni szkieletowych szczurów. Geletyuka i wsp. [1995] badali wpływ EFM o częstotliwości 42,25 GHz na kanały  $^+\text{K}$  aktywowane przez  $^{++}\text{Ca}$  w błonach hodowanych komórek nabłonka nerkowego. Stwierdzili, że 20–30-minutowa ekspozycja na promieniowanie o gęstości mocy ok.  $1 \text{ W/m}^2$  znacznie modyfikuje te kanały. Z kolei Pikov i wsp. [2010] w badaniach wykonanych na wycinkach kory mózgu zaobserwowali, że EFM o gęstości mocy ok.  $0,01 \text{ W/m}^2$  po 1 min ekspozycji powodowały znaczne zmiany szybkości wyzwalania neuronów, a także zmniejszyły częstotliwość generowania potencjałów czynnościowych (do 1/3 poziomu sprzed ekspozycji). Innym chętnie wykorzystywanym w badaniach modelem były ekspozycje wyizolowanych nerwów, zwłaszcza żabich. Burachas i Mascoliunas [1989] badali wpływ EFM o częstotliwości 77,7 GHz i gęstości mocy padającej  $100 \text{ W/m}^2$  na potencjał czynnościowy w izolowanym nerwie kulszowym. Stwierdzili, że zmniejszał się on wykładniczo i spadł 10-krotnie w ciągu 50–110 min ekspozycji. Po ustaniu ekspozycji wracał do normy, jednak nerw stawał się bardziej wrażliwy na działanie EFM (w następnych ekspozycjach tłumienie potencjału zajmowało tylko 10–15 min). Z kolei Chernyakov i wsp. [1989] badali wpływ trwającej 2–3 godz. ekspozycji na EFM z pasma 53–78 GHz o gęstości mocy padającej  $1–2 \text{ W/m}^2$  na izolowane nerwy żaby. Na podstawie wniosków z badań autorzy stwierdzili, że EFM zwiększyły prędkość przewodzenia potencjałów czynnościowych w szybkich włóknach nerwowych i zmniejszyły ją w włóknach wolnych. Obserwacji tych nie potwierdzili Pakhomov i wsp. [1997], którzy badali efekty krótkotrwałej ekspozycji na EFM o częstotliwości 40–52 GHz i gęstości mocy  $2,4–30 \text{ W/m}^2$  na przewodzenie potencjału czynnościowego w izolowanym preparacie nerwu kulszowego żaby. Ekspozycje trwające 10–60 min nie powodowały żadnych wykrywalnych zmian w przewodzeniu pobudzenia, ani w okresie refrakcji nerwu. Wspominani już wyżej Chernyakov i wsp., w swojej pracy z 1989 r., przedstawili wyniki badań wpływu EFM o częstotliwościach 54–78 GHz na funkcje

błón w mięśniach poprzecznie prążkowanych i komórkach rozrusznika serca żaby. Ekspozycja na poziomie 1–1,5 W/m<sup>2</sup> trwająca przez 90 s (lub mniej) w niektórych przypadkach spowalniała naturalne zmniejszanie się potencjału błonowego w miocytach, a w niektórych zwiększała potencjał o 5–20 mV. Efekt ten zaobserwowano w 80% ekspozycji, bez wyraźnej zależności od częstotliwości promieniowania. Autorzy stwierdzili, że działanie to nie może mieć podłoża termicznego. W tej samej pracy przedstawili pozytywny wpływ takich ekspozycji skóry znieczulonych żab na indukowanie zmian częstości akcji serca. Opóźnienie zmian wynosiło około 1 min od rozpoczęcia ekspozycji. Wyniki tych badań są zgodne z wynikami uzyskanymi przez Pothepkine i wsp. [1992], którzy stwierdzili, że niektóre częstotliwości z zakresu 53–78 GHz (55 i 73 GHz) zmodyfikowały naturalną zmienność rytmu serca u znieczulonych szczurów. Promieniowanie o maksymalnej gęstości mocy 100 W/m<sup>2</sup> stosowane było przez nich na górny kręgosłup piersiowy przez 20 min. Należy zauważyć, że ekspozycja na EFM o częstotliwościach 61 lub 75 GHz nie wywoływała żadnego efektu, a inne badane częstotliwości powodowały zmiany dużo mniejsze niż 55 i 73 GHz. Temperatura skóry i całego ciała zwierząt pozostała niezmienną.

Nie zostały dotychczas rozpoznane mechanizmy, które mogłyby prowadzić do opisanych wyżej efektów w tkankach pobudliwych. Wielu autorów uważa, że mechanizmy te mają naturę termiczną – jak np. Shapiro i wsp. [2013], którzy badając wpływ EFM o częstotliwości 60 GHz na pobudliwość błony w oocytach żaby *Xenopus laevis*, stwierdzili zmiany zgodne z przewidywaniami modelu termicznego. Podobny wniosek przedstawili Alekseev i wsp. [1997] po badaniach wpływu EFM 75 GHz powodujących SAR do 4200 W/kg oraz odpowiedniego do niego wzrostu temperatury na szybkość wyzwalania neuronu stymulatora BP-4 u ślimaka stawowego *Lymnaea stagnalis*. W celu wyjaśnienia tego problemu stosowano również ekspozycję na EFM i odpowiadającą jej (tzn. powodującą podobny wzrost temperatury) ekspozycję na IR. Wyniki badań są rozbieżne. Sazonovi i wsp. [1995] badali pobudzenie aferentne w nerwie pęcherza u żab podczas ekspozycji na IR i na EFM (42,19 lub 0,15 GHz, 100 W/m<sup>2</sup>). Na podstawie wyników stwierdzili istotny statystycznie wpływ EFM na to pobudzenie. Ekspozycja na promieniowanie IR takiego pobudzenia nie powodowała. Z kolei Khramov i wsp. [1991] nie stwierdzili różnic we wpływie EFM o częstotliwości 34–78 GHz i promieniowania podczerwonego na szybkość spontanicznego wyzwalania potencjałów mechanoreceptorów u raków. W celu wyjaśnienia ewentualnego efektu nietermicznego postulowana jest hipoteza o zakłócaniu przez EFM orientacji w błonach cząsteczek naładowanych i bipolarnych. Mogłoby to powodować zmianę np. przepuszczalności błony komórek nerwowych, co stymulowałoby zakończenia neuronów lub wpływało na sygnał elektryczny przekazywany do reszty ciała [Le Dréan i wsp., 2013]. Należy jednak pamiętać, że

obecnie nie są znane mechanizmy fizyczne mogące doprowadzać do reorientacji dużych cząsteczek dipolarnych w polach o tak wielkich częstotliwościach (uważa się, że może to zachodzić dla pól o częstotliwościach co najwyżej megahercowych).

Podsumowując ten przegląd badań *in vitro* i *in vivo* na zwierzętach, zwłaszcza dotyczących funkcjonowania błon komórkowych (w tym błon pobudliwych), można zauważyć, że istnieje wiele danych wskazujących na możliwość zaburzenia tego działania przez EFM. Wielu specjalistów stwierdza, że u podstaw tych nieprawidłowości leżą efekty nietermiczne, a więc takie, jakich należy spodziewać się przy ekspozycji na PEM związane z systemem 5G. Jednak z uwagi na niedociągnięcia metodologiczne (mała liczebność prób, powtórzeń eksperymentów, brak kontroli negatywnej/pozytywnej itd.) w większości z tych badań trudno je uznać za kompletne i wiarygodne.

Jak wiadomo, największe zaniepokojenie społeczeństwa budzi możliwość kancerogennego działania PEM. Prace wykonane w XX wieku przeważnie wskazywały na brak efektów genetycznych mogących być przyczyną powstawania nowotworów u ludzi. Najczęściej cytowaną z tego zakresu pracą jest artykuł Dardalhona i wsp. [1981], w którym autorzy przedstawili swoje badania biologicznych skutków ekspozycji na PEM o częstotliwości 9,4 GHz i 70–75 GHz na modelach *Escherichia coli* i *Saccharomyces cerevisiae*. Dla gęstości mocy padającej poniżej 600 W/m<sup>2</sup> i wartości SAR nieprzekraczających 28 W/kg nie stwierdzono istotnego wpływu na przeżycie, mutacje i naprawy uszkodzeń DNA, a także na wydajność procesu sporulacji u grzybów. Współcześnie Koyama i wsp. [2016] poddawali komórki nabłonka ludzkiej rogówki (HCE-T) i soczewek (SRA01/04) działaniu promieniowania 60 GHz o gęstości mocy 10 W/m<sup>2</sup> przez 24 godz. Nie stwierdzili statystycznie istotnego wzrostu częstości występowania mikrojąder w badanych komórkach.

Test kometowy i badania ekspresji białka szoku cieplnego (Hsp) również nie wykazywały statystycznie istotnych efektów ekspozycji. Taki pogląd potwierdzają również badania Logani i wsp. [2004]. Badali oni potencjał genotoksyczny EFM 42,2±0,2 GHz u dorosłych samców myszy BALB/c. Promieniowanie stosowano na obszar nosa myszy przez 30 min/dzień przez 3 kolejne dni. Gęstość mocy padającej wyniosła 315±50 W/m<sup>2</sup>. Maksymalny SAR wynosił 622±100 W/kg. Zwierzętom z jednej z grup wstrzyknięto cyklofosfamid – miało to na celu zbadanie czy ekspozycja na EFM ma jakikolwiek wpływ na jego genotoksyczność. Stopień genotoksyczności oceniano na podstawie częstości występowania mikrojąder w polichromatycznych erytrocytach krwi obwodowej i komórkach szpiku kostnego zebranych 24 godz. po ekspozycji. Wyniki wykazały, że częstość występowania mikrojąder w 2000 polichromatycznych erytrocytach nie różniła się istotnie

między grupami kontrolnymi a narażonymi na EFM. Autorzy nie zaobserwowali również istotnych różnic w liczbie mikrojąder indukowanych przez cyklofosfamid u myszy narażonych na działanie EFM i myszy kontrolnych. Nie było zatem dowodów na wzmożenie indukcji genotoksyczności w komórkach krwi obwodowej i szpiku kostnym myszy eksponowanych na EFM. Jednym z efektów genotoksycznych mogą być zaburzenia ekspresji genów. Nie dziwi więc fakt, że podjęto badania mające na celu wykazanie, czy zaburzenia te występują na skutek ekspozycji na EFM. Wyniki większości wykonanych badań skłaniają do wniosku, że działanie to nie występuje w ogóle lub jest związane z efektem termicznym. Wskazują na to np. badania Millenbaugh i wsp. [2008]: poddawali oni szczury przedłużonej ekspozycji na EFM (6 i 24 godz.) o częstotliwości 35 GHz i gęstości mocy  $750 \text{ W/m}^2$  lub ekspozycji na ciepło (temperatura  $42^\circ\text{C}$ ), a następnie badali zmiany profilu ekspresji genów i histologię skóry. Uzyskane wyniki wskazują, że przedłużona ekspozycja na takie fale powoduje stres termiczny i uraz skóry, jednocześnie uruchamiając procesy naprawcze. Ten sam zespół w 2010 wykonał badania dotyczące ekspresji niektórych białek w osoczu krwi szczurów [Sypniewska i wsp., 2010]. Zastosowano test makrofagów i badania proteomiczne. Makrofagi szczurów inkubowano przez 24 godz. w warunkach działania ciepła ( $42^\circ\text{C}$ ) lub EFM o częstotliwości 35 GHz o gęstości mocy  $750 \text{ W/m}^2$ . W porównaniu do osocza szczurów kontrolnych, w osoczu szczurów narażonych na działanie ciepła lub EFM zaobserwowano zwiększoną ekspresję 11 białek i wzrost poziomów 3-nitrotyrozyny (markera stresu oksydacyjnego) w 7 białkach, które związane są z zapaleniem, stresem oksydacyjnym i metabolizmem energetycznym. Wyniki tego badania wskazują, że zarówno ciepło środowiskowe, jak i EFM o częstotliwości 35 GHz wywołują uwalnianie do plazmy mediatorów aktywujących makrofagi. Do podobnych wniosków doszli Le Quement i wsp. [2014]. Celem ich badania było sprawdzenie potencjalnego efektu EFM na stres retikulum endoplazmatycznego (ER). Linie komórkowe ludzkiej skóry były eksponowane na pole o częstotliwości 60,4 GHz i gęstości mocy z przedziału 10–200  $\text{W/m}^2$ . Przy użyciu metody RT PCR (*Reverse Transcriptase* PCR) badana była ekspresja genów stresowych ER (BIP i ORP150). Badania wykazały, że samo EFM nie zmieniało poziomów BIP i ORP150 w mRNA niezależnie od linii komórkowej, czasu ekspozycji czy gęstości mocy. Jednakże jednoczesne działanie EFM o gęstości mocy 200  $\text{W/m}^2$  ze znanym induktorem stresu ER thapsigarginem hamowało nadekspresję BIP i ORP150. Gdy zastosowano odpowiednią kontrolę, stwierdzono, że zjawisko to jest związane z efektem termicznym EFM. Autorzy ci potwierdzili swoje obserwacje w 2016 r., badając modyfikacje genomu ludzkich keratynocytów, które były eksponowane w polu 60,4 GHz o gęstości mocy padającej 200  $\text{W/m}^2$  przez 3 godz. w warunkach stałej temperatury. Nie zaobserwowano również modyfikacji transkryptomu keratynocytów

[Mahamoud i wsp., 2016]. Ten sam zespół [Zhadobov i wsp., 2007] badał wpływ promieniowania 60 GHz o małej gęstości mocy  $0,054 \text{ W/m}^2$  lub  $5,4 \text{ W/m}^2$  na ekspresję wrażliwych na stres genów molekularnych chaperonów poprzez ocenę poziomu klusteryny (CLU) i HSP<sub>70</sub> w linii komórek ludzkiego mózgu. Dane eksperymentalne wykazały brak znaczących modyfikacji w transkrypcji genów, mRNA i ilości badanych białek w czasie trwania ekspozycji i dla badanych gęstości mocy. Główne wyniki tego badania sugerują, że promieniowanie 60 GHz o niskiej mocy nie modyfikuje ekspresji białek opiekuńczych.

Należy również wspomnieć o istnieniu współczesnych badań wskazujących na możliwość występowania niewielkiego wpływu pól o intensywnościach niewywołujących efektu termicznego na ekspresję genów. Niezwykle interesująca z tego punktu widzenia jest praca Habauzita i wsp. [2014], w której autorzy starali się oddzielić efekty nietermiczny i termiczny działania EFM. Stwierdzili oni, że ekspozycja na EFM o wartości gęstości mocy  $200 \text{ W/m}^2$  doprowadziła do dużej modyfikacji ekspresji genów keratynocytów (665 genów). Jednakże jednocześnie obserwowali wzrost temperatury. Gdy w grupie badanej utrzymywano temperaturę na stałym poziomie, po ekspozycji na EFM nie obserwowano modyfikacji ekspresji genów. Autorzy stwierdzili jednak, że w grupie kontrolnej poddanej wyłącznie działaniu ciepła efekt modulacji ekspresji genów był nieco inny niż w przypadku działania EFM dającego taki sam przyrost temperatury (różnice ekspresji wystąpiły dla 34 genów). Podobnie niejednoznaczne wyniki zespół ten otrzymał, badając potencjalne reakcje komórek skóry na ekspozycję na EFM. Ludzkie komórki skóry były eksponowane przez 1, 6 lub 24 godz. na pole o częstotliwości 60,4 GHz o gęstości mocy padającej  $18 \text{ W/m}^2$  – SAR  $42,4 \text{ W/kg}$ . Przeprowadzono analizę na dużą skalę (41 000 próbek) w celu określenia, czy te ekspozycje mogą wpływać na ekspresję genów. W rygorystycznej analizie statystycznej wartości ekspresji genów nie zaobserwowano znaczących różnic w ekspresji genów. Jednakże gdy zastosowano jedynie test t-Studenta, stwierdzono, że w 130 próbkach mogą występować modyfikacje ekspresji pod wpływem pola. Do próbek tych zastosowano RT PCR i stwierdzono, że 5 genów po 6 godz. ekspozycji podlegało modyfikacji [Le Quément i wsp., 2012]. Jak wynika z przeglądu danych na temat wpływu EFM na ekspresję genów i efekty genotoksyczne, problem ten jest daleki od rozwiązania. Większość badań, w których obserwowano te skutki, wskazuje na mechanizm termiczny występujący dla bardzo wysokich wartości gęstości mocy, jakie prawdopodobnie nie będą występowały podczas użytkowania systemów 5G. Jednakże tych kilka badań, których autorzy sugerują możliwość występowania mechanizmu nietermicznego, szczególnie w przypadku długotrwałego oddziaływania, wskazuje na konieczność dalszych



intensywnych badań w tej dziedzinie, aby miarodajnie ocenić wszystkie potencjalne rodzaje zagrożeń zdrowia wynikających z oddziaływania EFM.

Innym efektem biologicznym o potencjalnym wpływie kancerogennym, a w związku z tym będącym obiektem zainteresowań specjalistów, jest wpływ EFM na proliferację komórek. Wyniki tych badań dostarczają sprzecznych informacji.

Yaekashiwa i wsp. [2017] badali wpływ trwającej przez 3, 70 lub 94 godz. ekspozycji na EFM z zakresu częstotliwości 70–300 GHz i nietermicznych poziomach gęstości mocy ( $12,7 \text{ W/m}^2$  dla 100 GHz i  $3,8 \text{ W/m}^2$  dla 300 GHz) na proliferację fibroblastów skóry ludzkiej (NB1RBG) i komórek ludzkiego glejaka (A172). Nie stwierdzili żadnych różnic pomiędzy grupami eksponowanymi a kontrolnymi. Podobny brak efektu wskazał Beneduci [2009], który badał potencjalne efekty antyproliferacyjne i wpływ na cykl komórkowy powodowany przez EFM (42,20 i 53,57 GHz) o małej gęstości mocy padającej ( $10 \text{ W/m}^2$ ), działających 1 godz./dzień przez 4 dni, w komórkach czerniaka ludzkiego RPMI 7932 *in vitro*. Jednak ten sam autor wraz ze współpracownikami [Beneduci i wsp., 2007] stwierdzili zauważalne zahamowanie proliferacji linii ludzkich komórek białaczki szpikowej K562. Zmiany te można było powiązać z odpowiednimi zmianami ultrastrukturalnymi przy napromieniowaniu ich EFM z zakresu 53–78 GHz o niskich gęstościach mocy (całkowita gęstość mocy padającej ok.  $0,01 \text{ W/m}^2$ ), w porównaniu z takimi samymi komórkami eksponowanymi pozornie (kontrola). W innej pracy ten sam zespół [Chidichimo i wsp., 2002] przedstawił dane świadczące o tym, że efekt ten występuje nie tylko w komórkach nowotworowych K562, ale także w linii ludzkich komórek raka piersi – MCF-7. Być może takie działanie może być wytłumaczeniem obserwacji Radzievskyego i wsp. [2004], którzy oceniali zdolności EFM do wpływania na wzrost nowotworu. Do badań zastosowali myszy model doświadczalny podskórnego wzrostu czerniaka B16 F10. Od 5. dnia po wstrzyknięciu komórek nowotworowych przez 5 dni eksponowali zwierzęta (nos) na EFM o częstotliwości 61,22 GHz i średniej padającej gęstości mocy  $133 \text{ W/m}^2$  – jednorazowa ekspozycja trwała 15 min. Autorzy zaobserwowali hamowanie wzrostu guza.

Należy jednak zauważyć, że w przeciwieństwie do wyżej opisanych obserwacji o negatywnym bądź obojętnym wpływie ekspozycji na EFM na proliferację istnieją też prace wskazujące na jej zwiększenie. Należą do nich prace zespołu Li i wsp. [2010]. Opisali oni badania z zastosowaniem modelu chondrocytów hodowanych z chrząstki stawowej kolana szczura. Eksponowali je na EFM o częstotliwości 30–40 GHz i gęstości mocy  $40 \text{ W/m}^2$  przez 30 lub 60 min. Badali wpływ takiej ekspozycji na ekspresję białek regulujących cykl komórkowy: kinazę zależną od cykliny 2 (CDK2) i cyklinę A. Wskazali, że ekspozycja na EFM promuje proliferację poprzez indukcję CDK2 i cykliny A oraz przyspiesza rozpoczęcie fazy S i przejście G2/M. Kilka lat później stwierdzili, że ekspozycja na

EFM promowała syntezę macierzy pozakomórkowej i postawili hipotezę, że zwiększenie proliferacji następuje poprzez wpływ na potencjał kanału  $K^+$  [Li i wsp., 2014].

#### 3.2.4. LECZNICZE ZASTOSOWANIE EFM

W ZSRR uważano, że zastosowanie EFM (samodzielnie lub w połączeniu z innymi czynnikami) może leczyć skutecznie 50 chorób i stanów. W 1995 r. w Rosji istniało ponad tysiąc ośrodków terapii z wykorzystaniem EFM, której poddano ponad 3 miliony osób. Obecnie dostępnych jest ponad 100 rodzajów aparatury terapeutycznej wykorzystującej EFM [Ryan i wsp., 2000]. Oczywiście takie znaczne zastosowanie medyczne pobudziło również badania podstawowe. Najwięcej prac dotyczyło terapii żołądka i dwunastnicy (ok. 25% badań); chorób sercowo-naczyniowych, w tym nadciśnienia tętniczego, choroby niedokrwiennej serca, zawału (ok. 25%); chorób dróg oddechowych, w tym gruźlicy, sarkoidozy, zapalenia oskrzeli, astmy (ok. 15%) i chorób skóry, w tym ran, owrzodzeń troficznycy, oparzeń, atopowego zapalenia skóry (ok. 10%). Jak już wspominaliśmy, prace na temat terapii EFM rozpoczęły się w latach 60. XX w. i ograniczyły się w zasadzie do ZSRR. W żadnym innym kraju terapia ta nie została zaakceptowana do oficjalnego stosowania. W Europie Zachodniej i USA zarzucano jej i badaniom jej towarzyszącym liczne niedostatki metodologiczne (np. brak ślepych prób), czy brak teorii wyjaśniającej obserwowane efekty, a także niejednoznaczność wskazań do leczenia. Jednak mimo upływu lat wciąż pojawiają się prace, których autorzy uzyskują potwierdzenie wyników badań wcześniejszych przy jednoczesnej poprawie ich błędów metodologicznych, np. Partyła i wsp. [2017]. Choć warunki ekspozycji stosowanych w tych badaniach są inne niż w przypadku ekspozycji, jaka będzie występowała po wdrożeniu systemu 5G (w terapii stosowana jest ekspozycja lokalna na powierzchnię o średnicy 2–3 cm), to jednak wyniki badań „terapeutycznych” mogą stanowić interesujący przyczynek do przewidywania skutków ekspozycji całego ciała.

Jednym z częstszych zastosowań EFM jest terapia bólu. Pozytywne wyniki badań w tym zakresie raportują w swoim przeglądzie literatury Usichenko i wsp. [2006]. Do terapii tej używa się pól o częstotliwościach 30–70 GHz i gęstości mocy ok. 100 W/m<sup>2</sup>. Jednak niektórzy autorzy obserwowali pozytywny efekt przeciwbólowy zachodzący dla EFM o zdecydowanie niższych gęstościach mocy. Kuźmenko [1998] stwierdził pozytywny wpływ fal o częstotliwości 54–78 GHz i gęstości mocy 0,03 W/m<sup>2</sup> na leczenie bólu głowy wywołanego miażdżycą tętnic mózgowych. Bakalijuk i wsp. [1998] uzyskali pozytywny efekt leczenia bólów zwyrodnieniowych stawów pod wpływem ekspozycji na pole o częstotliwości 55–62 GHz i gęstości mocy 0,1 W/m<sup>2</sup>. Zdania na temat mechanizmu działania przeciwbólowego są podzielone. Niektórzy autorzy, np. Lysenyuk

i wsp. [2000], Vorobyov i wsp. [2002] czy Usichenko i wsp. [2003] stwierdzają, że efekt ten występuje zarówno u zwierząt, jak i u ludzi eksponowanych w punktach akupunktury – ponad 30% badań klinicznych dotyczy właśnie tych punktów. Zakładając skuteczność terapeutyczną technik akupunktury czy akupresury, nie powinien zaskakiwać fakt stymulacji tych punktów przez subtelne ogrzewanie lub termiczny „mikromasaż” napromieniowywaniem EFM o gęstości ok.  $100 \text{ W/m}^2$ . Inni autorzy, np. Radzievsky i wsp. [2000], stwierdzają, że najwyraźniejsze efekty uzyskano przez napromieniowywanie obszarów skóry z wysoką koncentracją zakończeń nerwowych, co może potwierdzać znaczącą rolę obwodowego układu nerwowego. Proponuje się 2 modele wykorzystania EFM w terapii bólu:

1. Bezpośrednią aktywację komórek skóry (keratynocyty i/lub mastocyty), które indukują wydzielanie cząsteczek czynników sygnałowych w ogólnym krążeniu krwi [Szabo i wsp., 2006].
2. Stymulację obwodowego układu nerwowego, który z kolei aktywuje centralny układ nerwowy i indukuje wydzielanie peptydów opioidowych [Radzievsky i wsp., 2008].

Modele te mogą być wykorzystane do wyjaśniania kolejnych zastosowań EFM, jakim jest np. działanie na stany zapalne i układ odpornościowy. Szabo i wsp. [2001] przeanalizowali wpływ ekspozycji pola o częstotliwości 61,2 GHz na keratynocyty z naskórka, mierząc uwalnianie chemokin, i wykazali niewielki wzrost poziomu wewnątrzkomórkowego IL-1b – głównej cytokiny prozapalnej uwalnianej przez keratynocyty w odpowiedzi na różne bodźce. Do takiego samego wniosku prowadziły wyniki uzyskane przez Makara i wsp. [2003] w badaniach *in vivo* na myszach eksponowanych na promieniowanie 61,3 GHz o gęstości mocy  $310 \text{ W/m}^2$ , u których po 30 min ekspozycji przyrost temperatury wynosił  $1^\circ\text{C}$ . Wskazały one efekt prozapalny zainicjowany przez aktywację zakończeń nerwowych w skórze. Z drugiej strony Luschnikov i wsp. [2004] stwierdzili, że promieniowanie o częstotliwości 42 GHz i gęstości mocy  $1 \text{ W/m}^2$  zmniejsza, poprzez działanie neutrofilii, nasilenie procesu zapalnego u myszy. W związku z tym autorzy badań sugerują, że niektóre efekty terapeutyczne EFM można wytłumaczyć ich działaniem przeciwzapalnym, które jest realizowane poprzez modulację czynnościowej aktywności neutrofilii w ognisku zapalenia. O wpływie EFM na funkcjonowanie układu odpornościowego są również przekonani Makar i wsp., którzy w 2005 i w 2006 r. opublikowali kolejne wyniki ze wspomnianych wyżej badań i wykazali, że promieniowanie o częstotliwości 42 GHz aktywuje działanie komórek NK (*Natural Killer*).

Terapia EFM jest także stosowana do łagodzenia skutków ubocznych chemioterapii u pacjentów onkologicznych. Jest skuteczna w leczeniu narządów oddalonych od miejsca działania EFM, np. tych, których niedomaganie wywołuje dolegliwości gastryczne. Powstaje więc pytanie – w jaki

sposób EFM łagodzą te dolegliwości, jeśli działają powierzchownie tylko w obrębie skóry? Jest wiele hipotetycznych odpowiedzi na ten temat, uwzględniających m.in. zjawisko rezonansu, napromieniowanie punktów stosowanych w akupunkturze, stymulację receptorów skórnych, reakcję humoralną. Dopóki jednak nie zostanie poznany patomechanizm działania terapeutycznego, trudno jest zaakceptować taką terapię w kontekście medycyny bazującej na faktach. Bardziej przekonujące są dane na temat leczenia ran skóry, zwłaszcza zakażeń pooperacyjnych (wspomniany wyżej efekt przeciwzapalny EFM). Wątpliwości budzi natomiast opisywana przez niektórych autorów możliwość regeneracji nerwów i kości [Kolossova i wsp., 1996; Pakhomov i wsp., 1998].

Ten skrótowy przegląd najnowszych badań dotyczących terapii EFM pokazuje, że stosowane w nich gęstości mocy promieniowania (w większości przypadków  $100 \text{ W/m}^2$  i więcej) są zdecydowanie wyższe niż te, z którymi będziemy mieli do czynienia w miejscach dostępnych dla pracowników obsługi i osób postronnych w otoczeniu anten nadawczych systemu 5G. Jednakże mechanizmy prowadzące do powstawania efektów terapeutycznych, które wiążą działanie pól na komórki zewnętrznych tkanek człowieka (pochłanianie energii następuje na głębokościach rzędu milimetra) z działaniem ogólnoustrojowym, mogą zapewne zachodzić również dla niższych poziomów pól. Świadczyć o tym mogą np. wspomniane już badania Luschnikova i wsp. [2004], w których efekt obserwowano dla ekspozycji o poziomie  $1 \text{ W/m}^2$ . Dlatego konieczne są intensywne badania innych efektów biologicznych, zwłaszcza nietermicznych.

Brakuje badań na temat współdziałania EFM i PEM o innych częstotliwościach emitowanych przez urządzenia nadawcze systemu 5G i inne urządzenia radio- i telekomunikacyjne oraz inne źródła (elektroenergetyczne, RFID, ładowanie bezprzewodowe, kuchnie indukcyjne itd.). Nie ma również opisów skutków biologicznych i zdrowotnych związanych z długotrwałą ekspozycją na EFM, w tym także ekspozycją osób szczególnie wrażliwych (dzieci, kobiet w ciąży, osób z chorobami przewlekłymi). Dotychczasowe badania dla pól o tych częstotliwościach wskazują na duże prawdopodobieństwo wystąpienia sumowania się negatywnych dla środowiska i człowieka skutków konglomeratu PEM o różnych częstotliwościach. W wypadku wdrożenia technologii 5G miejsca wolne od ekspozycji na pola złożone, składające się z EFM i obecnie już emitowanych pól radiofalowych (zwłaszcza w przypadku wielkich miast), będą trudne do znalezienia.

W ostatnich latach ukazało się kilka apeli/raportów, w których naukowcy o ustalonej międzynarodowej renomie wskazują, że skutki gwałtownego rozwoju technologii bezprzewodowej stanowią naglący, chociaż dotychczas bagatelizowany, problem zdrowia publicznego. W 2015 r. w czasopiśmie „European Journal of Oncology” został opublikowany apel „International EMF

Scientist Appeal”, w którym przedstawiono opinie 215 naukowców z 40 krajów na temat skutków zdrowotnych związanych z ekspozycją na niejonizujące PEM o częstotliwości od ELF (*extremely-low frequency*) do radiofalowej (w tym EFM). Podpisali go wybitni uczeni o udokumentowanych osiągnięciach w zakresie badań bioelektromagnetycznych, a następnie został on przedstawiony członkom Organizacji Narodów Zjednoczonych oraz WHO i UENP (United Nations Environmental Programme). Specjaliści ci stwierdzają, że waga dowodów opublikowanych w recenzowanych naukowych czasopismach wskazuje na konieczność zastosowania większych środków ostrożności w celu zmniejszenia lub wyeliminowania narażenia na PEM [Kelley i wsp., 2015] Szczegółowa analiza przedstawionych tam argumentów wymagałaby znacznie obszerniejszego opracowania, co nie było możliwe w tej ekspertyzie.

13 września 2017 r. 180 naukowców i lekarzy z 35 państw podpisało apel „Scientists Appeal for Moratorium on 5G Deployment” o moratorium dotyczące potencjalnych skutków zdrowotnych związanych z rozwojem technologii 5G. Specjaliści ci uważają, że technologia 5G zwiększy ekspozycję na PEM o częstotliwości radiofalowej (na którą w środowisku składają się m.in. technologie 2G, 3G, 4G). Sugerują, aby wdrożenie technologii 5G ograniczyć do czasu, gdy naukowcy, niezależni od przemysłu, w pełni wyjaśnią potencjalne konsekwencje dla środowiska i zdrowia ludzi. Uważają ponadto, że negatywne skutki działania tych pól są już udowodnione („Coordinating and Advisory Committee for the «International EMF Scientist Appeal» – Martin Blank, Magda Havas, Elizabeth Kelley, Henry Lai, Joel Moskowitz). Naukowcy obawiają się, że technologia 5G może prowadzić do rozwoju chorób nowotworowych, neurodegeneracyjnych, wad rozwojowych, niepłodności, nadwrażliwości elektromagnetycznej i uzależnień. Szczegółowa analiza tego apelu nie ma uzasadnienia, ponieważ w tej ekspertyzie zebrano i omówiono najnowsze dane na temat potencjalnych zagrożeń dla zdrowia.

Oczywiście część środowiska specjalistów zajmujących się ochroną przed PEM zawsze uważała, że obawy dotyczące szkodliwego działania PEM, jak te zawarte w Apelu, są zbyt . Osepchuk i Petersen [2003] twierdzili już ponad 15 lat temu, że „istnieją przekonania lub spekulacje na temat skutków i zagrożeń na poziomie narażenia znacznie poniżej limitów bezpieczeństwa. Są to prace pozanaukowe i wspierają koncepcje nadwrażliwości i zasady ostrożności. Komitet koordynacyjny standardów w zakresie promieniowania niejonizującego w ramach Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników (SCC28 w ramach IEEE) w 1999 r. wyraził opinię, że regulacje i procedury, które mają charakter ostrzegawczy są uznaniowe”.

Jak dotąd nie wypracowano konsensusu – wielu specjalistów uważa, że wyniki dotychczasowych badań są wystarczające, aby zastosować obowiązującą m.in. w UE „zasadę ostrożności” ze względu

na znaczną liczbę osób potencjalnie ekspozowanych środowiskowo na EFM oraz na współistnienie innych czynników środowiskowych (m.in. pyłów drobnocząsteczkowych) [Bracken-Roche i wsp., 2017]. Podkreślają oni konieczność oszacowania ryzyka zdrowotnego i związanych z nim przewidywanych kosztów wprowadzenia technologii 5G, gdyż problem ten będzie dotyczył całej populacji [Russel, 2018]. Biorąc pod uwagę zasadę WHO „*health in all policies*” (zdrowie we wszystkich obszarach polityki), rozwój nowych technologii (w tym 5G) powinien być zintegrowany z aktywnym zaangażowaniem instytucji odpowiedzialnych za zdrowie środowiskowe dla redukcji potencjalnego ryzyka zdrowotnego dla ekspozowanej populacji [Di Ciaula, 2018].

## 4. ZASADY OCHRONY PRZED ELEKTROMAGNETYCZNYMI ZAGROŻENIAMI

### BEZPIECZEŃSTWA I ZDROWIA<sup>2</sup>

#### 4.1. ROZWÓJ SYSTEMU OCHRONY PRZED ELEKTROMAGNETYCZNYMI ZAGROŻENIAMI

##### BEZPIECZEŃSTWA I ZDROWIA LUDZI

W wyniku badań naukowych oraz monitorowania bezpieczeństwa i higieny pracy przy użytkowaniu różnego typu urządzeń i instalacji emitujących PEM – rozwijanych stopniowo w miarę postępującego od początku XX wieku rozwoju technologii wykorzystujących PEM w przemyśle, medycynie i życiu codziennym – ustalono, że dla ochrony życia i zdrowia pracujących i ludności konieczne jest eliminowanie lub ograniczanie zagrożeń związanych z oddziaływaniem PEM. Wobec dużej złożoności problemu, pomimo opracowania przez ekspertów wielu dokumentów systematyzujących wiedzę na tematy:

- mechanizmów powstawania poszczególnych zagrożeń związanych z oddziaływaniem PEM,
- okoliczności wymagających wprowadzania działań ochronnych,
- miar i metod oceny zagrożeń,

dotychczas brak jest międzynarodowego konsensusu w kwestii objęcia tych zagadnień wiążącymi wymaganiami prawnymi. Brakuje również porozumienia co do określenia zakresu i struktury takich kryteriów prawnych – zarówno w odniesieniu do ochrony ludności jak i pracujących, a także zasad użytkowania urządzeń i instalacji emitujących PEM [Korniewicz i wsp., 2001; Karpowicz i wsp., 2008; ICNIRP 1998, 2009, 2010, 2014; SCENIHR 2015; IARC 2002, 2013; Dyrektywa 2013/35/UE; Council Recommendation 1999/519/WE].

##### 4.1.1. OCHRONA PRACOWNIKÓW: ZAKRES OCHRONY WYMAGANY PRZEZ DYREKTYWĘ 2013/35/UE

Najnowszym dokumentem, wiążącym prawnie wszystkie państwa Unii Europejskiej, odnoszącym się do ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi, jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta Dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 Dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca Dyrektywę 2004/40/WE [Dyrektywa, 2013]. W Dyrektywie tej najpełniej (na podstawie najbardziej aktualnych

---

<sup>2</sup> Rozważania prezentowane w niniejszym opracowaniu nie dotyczą parametrów ekspozycji i wymagań bezpieczeństwa względem pacjentów poddawanych procedurom medycznym.

opracowań naukowych) scharakteryzowano różnorodne zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia, jakie należy rozpoznać, ocenić i ograniczyć w środowisku.

Wprawdzie Dyrektywa 2013/35/UE formalnie odnosi się do ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi, ale należy podkreślić, że mechanizmy oddziaływania PEM na ludzi i środowisko są identyczne w środowisku pracy i środowisku życia codziennego. Podobnie większość istotnych dla bezpieczeństwa i zdrowia zagrożeń może dotyczyć i pracowników, i ludności. Najistotniejszą cechą rozgraniczającą wspomniane okoliczności powstawania zagrożeń elektromagnetycznych jest stopień zróżnicowania osób podlegających oddziaływaniu PEM. W środowisku pracy ekspozycja dotyczy dorosłych osób – w wielu przypadkach wyłącznie tych spełniających rygorystyczne wymagania dotyczące stanu zdrowia, płci, wieku, kompetencji i umiejętności. W miejscach powszechnie dostępnych należy natomiast uwzględnić możliwy pobyt osób w każdym wieku i stanie zdrowia, a także z reguły nie poinformowanych o charakterystyce zagrożeń elektromagnetycznych i sposobach ich unikania. Ponadto w środowisku pracy dopuszcza się ograniczanie poziomu zagrożeń poprzez zastosowanie odpowiednich środków ochronnych, organizacyjnych lub technicznych. W miejscach powszechnie dostępnych oczekuje się bezwarunkowego bezpieczeństwa osób w nich przebywających, bez konieczności jakiegokolwiek interwencji motywowanej ochroną przed zagrożeniami elektromagnetycznymi. Zasada ta jest szczególnie istotna w przypadku ochrony dzieci, ponieważ nie mają one świadomości potencjalnych negatywnych konsekwencji i umiejętności unikania niebezpieczeństw związanych z PEM.

W tabeli 4.1.1 wskazano, które z zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia objętych wymaganiami Dyrektywy 2013/35/UE mogą być związane z oddziaływaniem promieniowania mikrofalowego na ludzi bądź obiekty materialne.

Wspomniana Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE została ustanowiona na podstawie delegacji art. 153 ust. 2 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej w celu realizacji art. 31 ust. 1 Karty praw podstawowych Unii Europejskiej, który wskazuje, że każdy pracownik ma prawo do warunków pracy szanujących jego zdrowie, bezpieczeństwo i godność. Dyrektywa ustanawia jedynie minimalne wymagania w zakresie ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi, pozostawiając w ten sposób państwom członkowskim UE możliwość utrzymania lub przyjęcia bardziej korzystnych przepisów w zakresie ochrony pracowników przed oddziaływaniem PEM, w szczególności poprzez ustalenie niższych interwencyjnych poziomów narażenia (IPN) lub granicznych poziomów oddziaływania (GPO).



Tab. 4.1.1. Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia, których rozpoznanie, ocena i ograniczanie są wymagane w środowisku oraz ich powiązanie ze skutkami oddziaływania promieniowania mikrofalowego

Lp.	Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia związane z oddziaływaniem PEM	Czy zagrożenie może być związane z oddziaływaniem promieniowania mikrofalowego
wynikające ze skutków biofizycznych bezpośredniego oddziaływania PEM na organizm człowieka, które obejmują indukowane w organizmie pole elektryczne i prąd elektryczny:		
1.	zakłócenia naturalnych procesów elektrofizjologicznych w organizmie	tak
2.	skutki termiczne (wzrost temperatury tkanek) na powierzchni ciała lub wewnątrz organizmu	tak
3.	prądy kończynowe indukowane – prądy pojemnościowe indukowane bezpośrednio w organizmie	nie
wynikające z pośrednich skutków oddziaływania PEM na obiekty materialne, które mogą spowodować:		
4.	zakłócenia działania elektronicznego sprzętu medycznego i elektronicznych wyrobów medycznych, w tym stymulatorów serca i innych implantów lub wyrobów medycznych przeznaczonych do wprowadzenia w części do ludzkiego ciała, tj. aktywnych implantów medycznych (elektronicznych)  (w Dyrektywie 2013/35/EU, wersja anglojęzyczna, użyto określenia: <i>medical devices worn on the body</i> , obejmującego zarówno urządzenia medyczne częściowo implantowane, jak i użytkowane na ciele bez implantacji)	tak
5.	skutki termiczne oddziaływania PEM na pasywne implanty medyczne (mechaniczne)	tak

6.	zagrożenie balistyczne, rozumiane jako zagrożenie wynikające z gwałtownego przemieszczania się przedmiotów ferromagnetycznych w przestrzeni pola magnetostaticznego	nie
7.	uruchomienie elektrycznych urządzeń inicjujących detonację materiałów wybuchowych	tak
8.	zapłon materiałów łatwopalnych lub atmosfer wybuchowych wskutek oddziaływania wyładowania elektrostatycznego lub wyładowania iskrowego w obiektach technicznych spowodowanego prądem indukowanym lub prądem kontaktowym stanu przejściowego	nie
9	prądy kończynowe kontaktowe – prądy przepływające w kończynach podczas oddziaływania PEM i dotykania obiektów materialnych	nie

Ponadto wdrożenie tej Dyrektywy nie powinno służyć uzasadnieniu jakiegokolwiek pogorszenia – w stosunku do dotychczasowej – sytuacji w poszczególnych państwach członkowskich UE. Limity GPO i IPN określone w Dyrektywie to hybrydowe miary dotyczące oceny zagrożeń elektromagnetycznych.

Graniczne poziomy oddziaływania określane są jako limity dotyczące miar wspomnianego oddziaływania bezpośredniego PEM i wykorzystywane głównie podczas oceny wyników modelowania komputerowego zagrożeń elektromagnetycznych. Interwencyjne poziomy narażenia rozumiane są jako limity dotyczące miar narażenia na PEM w miejscu pracy (tj. limity natężenia pola elektrycznego w każdym środowisku, a w polu bliskim również limity natężenia pola magnetycznego), umożliwiające uproszczoną ocenę, czy narażenie na PEM spełnia wymagania określone przez limity GPO, lub w celu zastosowania środków ochronnych, które są odpowiednie do zagrożeń rozpoznanych w środowisku pracy. Wykorzystywane są podczas oceny wyników pomiarów PEM w środowisku pracy.

Zagrożenia elektromagnetyczne określono w Dyrektywie 2013/35/UE jako: szkodliwe dla zdrowia, niebezpieczne lub uciążliwe skutki bezpośredniego lub pośredniego oddziaływania PEM.

Do promieniowania mikrofalowego różnych częstotliwości w Dyrektywie określono następujące miary zagrożeń – GPO, powiązane z wartościami określonych dla nich limitów:

- w paśmie częstotliwości od 100 kHz do 6 GHz limity GPO dotyczą współczynnika szybkości pochłaniania właściwego energii SAR i odnoszą się do ochrony przed skutkami termicznymi narażenia na PEM – uśrednionymi w całym ciele (limit 0,4 W/kg), ocenianymi miejscowo w głowie i tułowiu (limit 10 W/kg) lub kończynach (limit 20 W/kg). Uśrednione ponadto w okresie dowolnych 6 min miejscowe wartości SAR oceniane są po uśrednieniu w dowolnych 10 g zwartej tkanki o jednorodnych w przybliżeniu właściwościach dielektrycznych, najczęściej w kształcie sześciangu o boku ok. 20 mm. Parametr ten ocenia się metodami obliczeniowymi z wykorzystaniem specjalistycznych metod symulacji numerycznych i wysokorozdzielczych modeli ciała człowieka;
- w paśmie częstotliwości od 6 GHz do 300 GHz limity GPO dotyczą uśrednionej na dowolnych 20 cm<sup>2</sup> narażonej powierzchni gęstości mocy S, padającego promieniowania mikrofalowego (limit 50 W/m<sup>2</sup>) oraz gęstości mocy padającego promieniowania mikrofalowego uśrednionego na powierzchni 1 cm<sup>2</sup> (limit 1000 W/m<sup>2</sup>). Aby skompensować zmniejszanie się głębokości wnikania promieniowania mikrofalowego wraz ze wzrostem częstotliwości podczas oceny narażenia, wartość gęstości mocy powinna zostać uśredniona w czasie: w paśmie częstotliwości od 6 GHz do 10 GHz w okresie dowolnych 6 min, a dla wyższych częstotliwości w stopniowo skracanym czasie, np. do ok. 2 min przy ocenie promieniowania o częstotliwości 25 GHz;
- w paśmie częstotliwości od 300 MHz do 6 GHz limity GPO dotyczące wrażeń słuchowych spowodowanych narażeniem głowy na promieniowanie impulsowe (modulowane) dotyczą również miejscowych wartości energii pochłoniętej SA w tkankach głowy (limit 10 mJ/kg); miejscowe wartości SA oceniane są po uśrednieniu w dowolnych 10 g zwartej tkanki.

Miary zagrożeń elektromagnetycznych, dla których określono limity GPO, są niemożliwe lub bardzo trudne do zmierzenia lub oszacowania komputerowego w odniesieniu do rzeczywistych warunków narażenia w miejscu pracy. Dlatego wykorzystując dane naukowe charakteryzujące powiązanie skutków biofizycznych narażenia z parametrami charakteryzującymi PEM w środowisku bez obecności w nim ludzi, oszacowano wspomniane limity IPN (umożliwiające ocenę zagrożeń ekwiwalentną do oceny miar GPO). Jednak w przypadku małej odległości między źródłem promieniowania a ciałem człowieka parametry PEM stają się bardzo złożone. Niepewność oceny zagrożeń na podstawie pomiaru natężenia pola elektrycznego narasta wówczas do nieakceptowalnego poziomu (a jest to obecnie jedyny technicznie wykonalny w środowisku pracy pomiar parametrów narażenia na promieniowanie o częstotliwościach przekraczających ok. 3 GHz). W takiej sytuacji – z powodów formalno-prawnych – konieczne jest bezpośrednio

ocenianie parametrów zagrożeń elektromagnetycznych powiązanych z limitami GPO, czyli w praktyce wdrożenie kosztownych metod oceny wartości SAR i SA poprzez modelowanie komputerowe. Obecnie brakuje wiążących ustaleń dotyczących odległości człowieka od źródła PEM, przy której można już traktować wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego jako miarodajną ocenę zagrożeń. Dane prezentowane w opracowaniach naukowych wskazują, że przy odległości człowieka mniejszej od 20 cm od źródła PEM konieczna jest ostrożność w interpretacji oceny zagrożeń na podstawie wyników pomiarów natężenia pola elektrycznego.

Wspomniany problem „automatycznej” obligatoryjności stosowania złożonych i kosztownych metod komputerowych oceny zagrożeń elektromagnetycznych wynika ze struktury wymagań ochronnych zawartych w Dyrektywie 2013/35/UE, gdzie jako rozstrzygające kryterium dopuszczalności narażenia na silne PEM (a takie jest z reguły bezpośrednio przy jego źródle) określono limity GPO.

Porównywalny do wymagań Dyrektywy 2013/35/UE poziom ochrony pracowników można osiągnąć w praktyce przy wykorzystaniu kombinacji limitów IPN dotyczących rozkładu przestrzennego natężenia pola elektrycznego zmierzonego w środowisku pracy i jego wybranych parametrów (np. wartości maksymalnej przy źródle i średniej w miejscu przebywania pracownika, maksymalnego narażenia kończyn, głowy i tułowia, itp.), skorelowanych z wybranymi limitami GPO (na podstawie dostępnych opracowań naukowych, wybranych jako uzasadnienie wspomnianych limitów IPN i procedury ich oceny, ale niestanowiących części wiążącego aktu prawnego). W takiej formule, w razie konieczności rozpatrzenia bardzo złożonych okoliczności silnego narażenia, nadal istnieje możliwość posłankowania się wynikami opracowań naukowych analizujących zależności GPO/IPN w poszczególnych przypadkach – obliczenia takie nie są niezbędne do przeprowadzenia procesu formalnej oceny silnego narażenia na PEM w środowisku pracy.

Omawiany model zapewnienia pracownikom ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi z wykorzystaniem kombinacji limitów IPN, tj. bez stanowienia wiążących prawnie limitów GPO, nie jest jedynie teoretycznym modelem. Doświadczenia stosowania takiej struktury wymagań ochronnych obejmują, np. w Polsce, okres od 1961 do 2016 r. w którym, ze względu na obowiązkowe wdrożenie wymagań Dyrektywy 2013/35/UE, nie można było uniknąć przyjęcia wiążących limitów GPO do oceny zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy [Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej, 2018]. Wykorzystywany wcześniej model oceny zagrożeń elektromagnetycznych na podstawie wyników pomiarów natężenia pola elektrycznego, kalibrowanych do ekwiwalentnych wartości gęstości mocy promieniowania elektromagnetycznego w razie pomiarów w przestrzeni promieniowania oddalonej od źródeł pola,

został potwierdzony wieloletnią praktyką jako rozwiązanie skuteczne, bardzo praktyczne i efektywne ekonomicznie. Obecnie analogiczne zasady oceny zagrożeń z wykorzystaniem jedynie limitów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego obowiązują tylko w odniesieniu do oceny zagrożeń elektromagnetycznych w miejscach powszechnie dostępnych [Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2003].

Problem ochrony pracowników przed odległymi skutkami narażenia na PEM został w Dyrektywie potraktowany w złożony sposób. Sformułowano opinię o niedostatecznie ugruntowanych dowodach naukowych istnienia związku przyczynowego odległej utraty zdrowia i narażenia na PEM. Uzasadnia to nieuwzględnienie skutków odległych w wykazie zagrożeń elektromagnetycznych podlegających wprost ocenie w środowisku pracy (omówionych w tabeli 4.1.1). Równocześnie w tym samym dokumencie określono zobowiązanie, skierowane zarówno do Komisji Europejskiej jak i do pracodawców, aby dostosowywać środki podejmowane w celu ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi do postępu wiedzy dotyczącej zagrożeń. Ponadto pracodawcy zobowiązani są do uwzględniania problemów zdrowotnych stwierdzonych w wyniku badań lekarskich pracowników w obligatoryjnym procesie rozpoznania, oceny i ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy. Omówiona sytuacja wydaje się być reakcją na zaklasyfikowanie PEM i promieniowania radiofaleowego do czynników przypuszczalnie rakotwórczych dla ludzi – grupa 2B w klasyfikacji Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem [IARC, 2002, 2013]. Stało się tak po analizie wyników badań INTERPHONE [2010] i innych, dotyczących głównie skutków zdrowotnych oddziaływania promieniowania radiofaleowego z pasma 27 MHz–2 GHz emitowanego przez telefony komórkowe. Należy zauważyć, że najnowsze badania epidemiologiczne nad występowaniem nowotworów w obrębie głowy i ekspozycji na RF emitowane przez telefony komórkowe potwierdzają klasyfikację IARC. We wszystkich opublikowanych w latach 2016–2018 metaanalizach jednoznacznie wykazano istotny wzrost ryzyka glejaka u długoletnich (> 10 lat) użytkowników telefonów komórkowych, zwłaszcza w położeniu ipsilateralnym (po stronie głowy, po której najczęściej umieszczany jest telefon komórkowy) [Yang i wsp., 2017; Carlberg i Hardell, 2017; Prasad i wsp., 2017, Momoli i wsp., 2017; Bortkiewicz i wsp., 2017]. Niektóre badania wskazują również na zwiększone ryzyko wystąpienia nerwiaka nerwu słuchowego, jednak wyniki w tym przypadku są niejednoznaczne – większość najnowszych prac nie potwierdza wzrostu ryzyka [Benson i wsp., 2013; Yang i wsp. 2017; Carlberg i Hardell, 2017; Prasad i wsp., 2017; Momoli i wsp., 2017; Bortkiewicz i wsp., 2017]. Oceniając całość wymagań Dyrektywy 2013/35/UE, zauważamy, że realizując wszystkie jej wymagania, pracodawca musi uwzględnić ochronę pracowników przed skutkami odległymi narażenia na PEM

oraz przed zagrożeniami wynikającymi z oddziaływania wielu innych czynników występujących równocześnie z PEM w środowisku, mimo że w art. 1. Dyrektywy zadeklarowano wyłączenie skutków odległych z zakresu jej stosowania. Jest to konsekwencją zobowiązania pracodawcy do uwzględnienia wyników badań medycznych pracowników w ocenie ryzyka zawodowego i rozwoju wiedzy naukowej w kontekście stosowanych środków ochronnych.

Ponadto w Dyrektywie określono obowiązek ochrony przed niekorzystnymi skutkami dla zdrowia i zagrożeniami bezpieczeństwa, które mogą wynikać z narażenia na PEM pracowników szczególnie zagrożonych – poprzez zapobieganie zakłócania przez PEM działania wyrobów medycznych, takich jak protezy metalowe, stymulatory serca i defibrylatory, implanty ślimakowe i inne implanty lub wyroby medyczne przeznaczone do wprowadzenia w części do ludzkiego ciała (według angielskiej treści Dyrektywy 2013/35/EU – „wyroby medyczne noszone na ciele”). Podkreślono, że ochrona przed takimi zagrożeniami może być konieczna już przy poziomie narażenia nieprzekraczającym limitów IPN, a zatem środki ochronne powinny być dostosowane do takich okoliczności i wdrażane w środowisku pracy również wtedy, gdy rozpoznano poziom narażenia niższy od limitów IPN określonych w Dyrektywie. W dokumencie tym nie określono, jaki poziom narażenia można traktować jako niezagrażający pracownikom, tzn. nie określono, przy jakim poziomie narażenia pracowników nie ma konieczności wprowadzenia środków ochronnych (co można interpretować jako konieczność ochrony pracowników przed każdym oddziaływaniem PEM).

#### 4.1.2. OCHRONA LUDNOŚCI: ZAKRES OCHRONY SUGEROWANY PRZEZ ZALECENIE 1999/519/WE

Znacznie starszym dokumentem prawnym, jednakże nieobligatoryjnym, jest Zalecenie Rady Unii Europejskiej z dnia 12 lipca 1999 r. w sprawie ograniczenia narażenia ogółu społeczeństwa na pola elektromagnetyczne (0 Hz–300 GHz) (1999/519/WE) [Council Recommendation, 1999]. Celem tego Zalecenia Rady jest ochrona zdrowia publicznego, więc jego szczegółowe zalecenia odnoszą się do przestrzeni, w której ludność przebywa długotrwale. Podobnie jak omówiona Dyrektywa 2013/35/UE, zalecenie to określa zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych z wykorzystaniem hybrydowego systemu limitów GPO i IPN<sup>3</sup>. Limity GPO i IPN dotyczące promieniowania mikrofalowego w obu przypadkach (Dyrektywa 2013/35/UE i Zalecenie 1999/519/WE)

---

<sup>3</sup> Z powodu braku oficjalnego tekstu polskiego zalecenia, stosujemy terminologię taką, jaka została zastosowana przy tłumaczeniu Dyrektywy 2013/35/UE, pomimo drobnych różnic językowych angielskiego tekstu Dyrektywy 2013/35/UE i zalecenia 1999/519/WE.

uzasadniono limitami zaproponowanymi w 1998 r. przez ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – Międzynarodową Komisję ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym), a więc limitami opracowanymi przed przyjęciem przez IARC klasyfikacji 2B dla PEM w 2001 i 2011 r. [IARC, 2002, 2013].

W 2015 r., w najnowszej opinii SCENIHR dotyczącej zagrożeń elektromagnetycznych, podano, że dane naukowe opublikowane w ostatnich latach nie podważają zdania IARC nt. potencjalnej rakotwórczości promieniowania elektromagnetycznego. Nowsze badania amerykańskiego programu toksykologicznego NTP również wspierają, a nawet wzmacniają klasyfikację IARC [Wyde i wsp., 2018].

Zgodnie z modelem zaproponowanym przez ICNIRP, przyjęto 5-krotnie niższe limity GPO dotyczące ludności od tych odnoszących się do narażenia pracowników, a limity IPN dotyczące ludności ok. 2,2-krotnie niższe (tj. zastosowano krotność równą pierwiastkowi kwadratowemu z liczby 5, stanowiącej krotność dla limitów GPO) (tabela 4.1.2).

Zalecenie wskazuje ogólne zasady i metody ochrony ludności, pozostawiając państwom członkowskim określenie szczegółowych zasad dotyczących użytkowania źródeł PEM. Ponadto państwa członkowskie UE mogą, zgodnie z Traktatem, zapewnić wyższy poziom ochrony niż określony w tym Zaleceniu. Realizacja Zalecenia w państwach członkowskich nie jest obligatoryjna. W Zaleceniu określono również działania, jakie powinny podejmować Komisja Europejska i państwa członkowskie, realizując ochronę bezpieczeństwa i zdrowia ludzi przed oddziaływaniem PEM. Do zadań państw członkowskich należy promocja informacji i zasad praktyki, w szczególności w odniesieniu do projektowania, instalacji i użytkowania urządzeń, zmierzającej do obniżania poziomów narażenia ludzi z równoczesnym uwzględnieniem aktywności ograniczającej czas narażenia. Oczywiście, działania na rzecz ograniczenia ekspozycji ogółu społeczeństwa na PEM powinny być zrównoważone z innymi korzyściami dla zdrowia, bezpieczeństwa i komfortu życia, które wnoszą urządzenia emitujące PEM w obszarach telekomunikacji, energetyki, bezpieczeństwa publicznego itd.

W Zaleceniu podkreślono, że również stosowanie do oceny zagrożeń elektromagnetycznych limitów IPN określonych dla ludności na poziomie niższym niż limity dotyczące pracowników (tabela 4.1.2), nie implikuje zabezpieczenia przed zakłóceniami funkcjonowania wyrobów medycznych, takich jak metalowe protezy, stymulatory serca i defibrylatory, implanty ślimakowe i inne implanty. Ocena odporności takich urządzeń na oddziaływanie PEM została w Zaleceniu delegowana do wymagań z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej i wymagań dotyczących urządzeń medycznych.

Tab. 4.1.2. Limity narażenia na promieniowanie mikrofalowe określone w Dyrektywie 2013/35/UE i Rekomendacji Europejskiej 1999/519/WE, zestawione z wytycznymi ICNIRP'1998

Zakres częstotliwości	Graniczne Poziomy Oddziaływania [Miary wewnętrzne]				Interwencyjne Poziomy Narażenia [Miary zewnętrzne]		
	uśredniony dla całego ciała SAR <sub>cc</sub> [W/kg]	lokalny w głowie i tułowiu SAR <sub>gt</sub> [W/kg]	lokalny w kończynach SAR <sub>k</sub> [W/kg]	gęstość mocy [W/m <sup>2</sup> ]	natężenie pola elektrycznego E [V/m]	natężenie pola magnetycznego H [A/m]	gęstość mocy ekwiwalentnej fali płaskiej S <sub>eq</sub> [W/m <sup>2</sup> ]
pracownicy [wg Dyrektywy 2013/35/UE i wytycznych ICNIRP'1998]							
10–400 MHz	0,4	10	20	---	61	0,16	10
400–2000 MHz	0,4	10	20	---	$3f^{0,5}$	$0,008f^{0,5}$	$f/40$
2–6 GHz	0,4	10	20	---	137	0,36	50
6–10 GHz	--- [0,4]	--- [10]	--- [20]	50	137	0,36	50
10–300 GHz	---	---	---	50	137	0,36	50
ludność [wg Zalecenia 1999/519/WE i wytycznych ICNIRP'1998]							
10–400 MHz	0,08	2	4	---	28	0,073	2
400–2000 MHz	0,08	2	4	---	$1,375f^{0,5}$	$0,0037f^{0,5}$	$f/200$
2–10 GHz	0,08	2	4	---	61	0,16	10
10– 300 GHz	---	---	---	10	61	0,16	10

Uwagi:

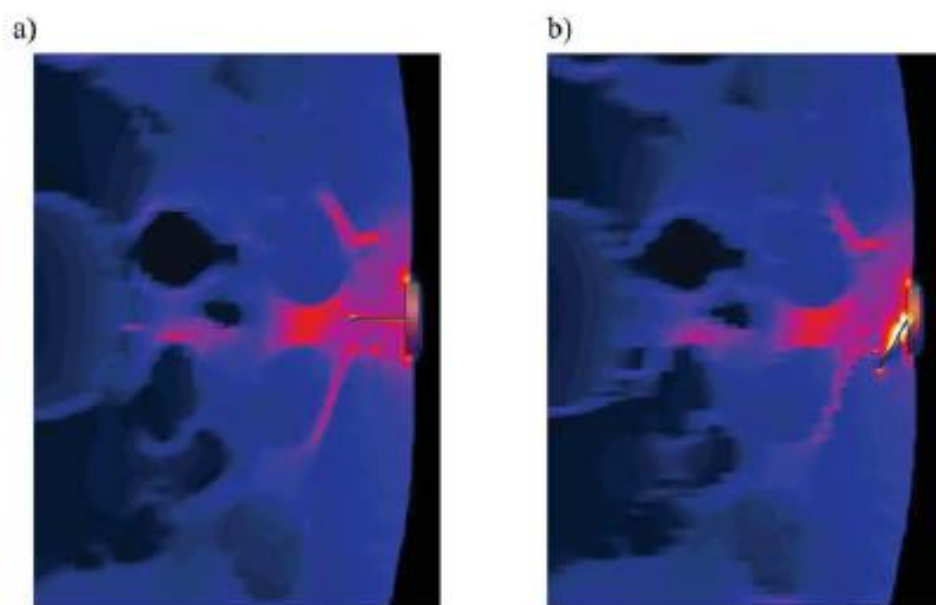
- f – częstotliwość w jednostkach z kolumny „zakres częstotliwości”,
- E i H – niezakłócona wartość skuteczna (RMS),
- w nawiasie kwadratowym podano wartości SAR określone tylko w wytycznych ICNIRP'1998.

#### 4.1.3. WYMAGANIA DOTYCZĄCE SZCZEGÓLNEJ OCHRONY UŻYTKOWNIKÓW IMPLANTÓW MEDYCZNYCH PRZED ZAGROŻENIAMI ELEKTROMAGNETYCZNYMI

Użytkowanie implantów medycznych, aktywnych (elektronicznych, np. pomp insulinowych lub stymulatorów serca) lub pasywnych (mechanicznych, np. endoprotez ortopedycznych), zwiększa bezpośrednie skutki biofizyczne oddziaływania PEM w sąsiedztwie implantu (rysunek 4.1.1). Ponadto oddziaływanie PEM na implant może zakłócać jego funkcjonowanie. Dlatego wrażliwość



użytkowników implantów medycznych na oddziaływanie PEM – zarówno w środowisku pracy, jak i w miejscach powszechnie dostępnych – jest większa. Obowiązek przeprowadzenia indywidualnej oceny poziomu zagrożeń elektromagnetycznych, jakie dotyczą użytkowników implantów medycznych, określa Dyrektywa 2013/35/UE, a Zalecenie 1999/519/WE podkreśla, że zagrożenia dla nich występują przy poziomie ekspozycji niższym niż limity ekspozycji ludności określone w Zaleceniu. Prawo pracy traktuje użytkowników implantów medycznych jako osoby szczególnie chronione. Ze względu na duże zróżnicowanie podatności implantów na niepożądane skutki oddziaływania PEM konieczna jest indywidualna ocena bezpieczeństwa każdego użytkownika, który zamierza przebywać w pobliżu źródeł PEM. Zadanie to wymaga analizy danych medycznych i technicznych. W przypadku osób narażonych zawodowo analizy te powinny być zatem elementem badań okresowych w zakresie opieki lekarza medycyny pracy (w przypadku istnienia wskazań po konsultacjach specjalistycznych – o konieczności takich konsultacji decyduje lekarz medycyny pracy). W przypadku populacji ogólnej ocena ta powinna być realizowana przez lekarza rodzinnego (również w przypadku istnienia wskazań po konsultacjach specjalistycznych).



Rys. 4.1.1. Rozkład przestrzenny zaindukowanego pola elektrycznego w przekroju skóry i tkanek podskórnych przy igle pompy infuzyjnej o długości 12 mm: a) igła wkluta prostopadle, b) igła wkluta pod kątem [Zbiory wyników symulacji komputerowych CIOP-PIB]

Wprawdzie ocena indywidualnej sytuacji zagrożenia PEM u użytkowników implanty medyczne wymaga analizy parametrów konkretnego implantu, ale przy jej przeprowadzaniu pomocne mogą

być również ogólne zalecenia międzynarodowe. Najlepiej uzasadnionym technicznie sposobem dokonywania oceny, zgodnym z promowanym przez Zalecenie 1999/519/WE podejściem ostrożnościowym, jest wykorzystanie takich poziomów PEM, w jakich wykonuje się testy odporności elektromagnetycznej urządzeń medycznych. Można je traktować jako interwencyjne poziomy narażenia stosowane dla użytkowników implantów zarówno w środowisku pracy, jak i w środowisku życia codziennego. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 60601-1-2:2015 (Medyczne urządzenia elektryczne – Część 1–2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego – Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne – Wymagania i badania) urządzenia do użytku w środowisku medycznym powinny być odporne na zakłócenia powodowane przez promieniowanie radiofalowe o częstotliwościach z pasma 0,08–2,7 GHz, o poziomie nieprzekraczającym 3 V/m, a urządzenia przeznaczone do użytku w środowisku domowym – odporne na zakłócenia do poziomu 10 V/m. Oba poziomy są zbliżone do aktualnie obowiązującego limitu ekspozycji w miejscach dostępnych dla ludności w Polsce (7 V/m) – dlatego można spodziewać się, że w miejscach, gdzie poziom ekspozycji jest zgodny z wymaganiami Rozporządzenia Ministra Środowiska w tej sprawie (Dz. U. 2003, poz. 1883), nie powinny występować zakłócenia pracy implantów powodowane przez promieniowanie elektromagnetyczne. Natomiast jeśli porównamy poziomy pola testowego (3 lub 10 V/m) z poziomami limitów europejskich (Zalecenie 1999/519/WE i Dyrektywa 2013/35/UE), otrzymamy wnioski przeciwne – przy narażeniach zbliżonych do obu limitów europejskich należy oczekiwać znacznego odsetka urządzeń o niewystarczającej odporności na zakłócenia. Obecnie nie istnieją wymagania dotyczące badań odporności na promieniowania o częstotliwościach przekraczających 2,7 GHz. Przewidywanie wyników przyszłych rozstrzygnięć normatywnych jest raczej spekulacją. Należy jednak uwzględnić fakt, że dla niektórych urządzeń elektronicznych limity odporności dla wyższych częstotliwości przyjmuje się na niższym poziomie (uwzględniając narastającą z częstotliwością oddziałującego promieniowania wrażliwość na zakłócenia). Dotychczas średni poziom ekspozycji ludności na promieniowanie radiofalowe nie przekracza 1–2 V/m (niezależnie od formalnych limitów narażenia ludności obowiązujących w poszczególnych państwach), nie stanowiąc zagrożenia dla użytkowników implantów medycznych [Moskalik, 2017]. Należy jednak podkreślić, że lokalnie poziom promieniowania oddziałującego na ludność lub pracowników przekracza wspomniane poziomy testów kompatybilnościowych, np. w otoczeniu niektórych bramkowych detektorów antykradzieżowych czy anten nadawczych sieci

radiokomunikacyjnych. Taka sytuacja może mieć miejsce również w przypadku projektowanych sieci 5G<sup>4</sup>.

Stosunkowo nową grupą o specyficznej wrażliwości na oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego są użytkownicy urządzeń monitorujących funkcje organizmu (z wykorzystaniem np. biocujników – różnorodne aplikacje z zakresu tele-, e-, m-medycyny) lub użytkujących urządzenia elektroniczne asystujące (np. aplikacje smartfonowe ułatwiające niewidomym orientację przestrzenną). Dla takich osób zakłócenie funkcjonowania ich osobistych urządzeń elektronicznych może wiązać się z istotnymi niedogodnościami i zagrożeniami. Dla tego typu urządzeń również stosuje się 3 V/m jako poziom pola testującego odporność elektromagnetyczną. Znacznie wyższe narażenia w granicach zaleceń europejskich mogą być czynnikiem istotnie ograniczającym funkcjonowanie takich osób w życiu codziennym, ale również w środowisku pracy. Konieczność zapewnienia im bezpieczeństwa wynika z wymagań Dyrektywy 2013/35/EU, jako użytkownikom urządzeń medycznych noszonych na ciele.

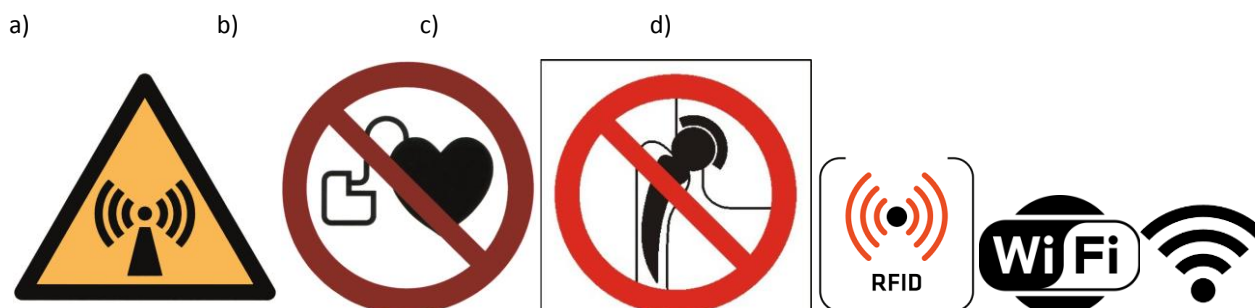
## 4.2. WYTYCZNE ICNIRP – CEL I ZNACZENIE PRAKTYCZNE

### 4.2.1. FORMALNY STATUS WYTYCZNYCH ICNIRP

International Commission on Non-Ionizing Radiation jest grupą specjalistów z kilkunastu krajów świata (Europy, Azji, Australii i Ameryki Północnej), prowadzących badania z różnych dziedzin

---

<sup>4</sup> Dobrą praktyką zapewniającą konieczną ochronę użytkownikom implantów jest znakowanie takich miejsc (np. znormalizowanymi piktogramami – rysunek 4.1.2.) lub umożliwianie użytkownikom implantów omijanie miejsc o podwyższonym poziomie ekspozycji (w przypadku detektorów bramkowych przepuszczanie takich osób przejściem omijającym detektor).



Rys. 4.1.2. Znaki ostrzegawcze dotyczące źródeł promieniowania elektromagnetycznego: a) promieniowanie niejonizujące; b) zakaz wstępu osobom z aktywnymi implantami medycznymi; c) zakaz wstępu osobom z implantami metalowymi (a, b, c według normy PN-EN ISO 7010:2012); d) nieznormalizowane piktogramy do oznaczania anten emisyjnych RFID i wi-fi.

nauki dotyczące oddziaływania PEM, promieniowania optycznego oraz infra- i ultradźwięków na ludzi i środowisko [<http://www.icnirp.org>]. Komisja ta korzysta ze wsparcia finansowego m.in. Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), Komisji Europejskiej i rządu Republiki Federalnej Niemiec, gdzie przy Federalnym Biurze Ochrony przed Promieniowaniem prowadzony jest sekretariat ICNIRP [<http://www.icnirp.org>]. Członkowie ICNIRP formalnie nie są reprezentantami organizacji naukowych, pozarządowych czy rządowych i są autonomicznie dokooptowywani do składu ICNIRP przez jego dotychczasowych członków [<http://www.icnirp.org>; Statut ICNIRP].

Formalnie ICNIRP nie dysponuje tzw. mandatem do opracowania limitów narażenia ludności i pracowników na potrzeby legislacji europejskiej. Kompetencje w tym zakresie należą do Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej, które autonomicznie decydują o zakresie wykorzystania propozycji opracowanych i opublikowanych przez ICNIRP w procesie legislacyjnym [reguły prac legislacyjnych UE].

Z perspektywy rozwoju międzynarodowych wymagań prawnych dotyczących ochrony ludności i pracujących przed zagrożeniami elektromagnetycznymi największym osiągnięciem ICNIRP wydaje się opublikowanie w 1998 r. wytycznych dotyczących kryteriów oceny zagrożeń elektromagnetycznych, wynikających z narażenia na PEM z całego zakresu częstotliwości do 300 GHz (z wyłączeniem jedynie zagadnień związanych z oddziaływaniem pola magnetostaticznego) [ICNIRP, 1998]. Były to pierwsze wytyczne międzynarodowe, obejmujące zagadnienia związane z PEM od małych częstotliwości aż po mikrofałe, opracowane przez członków ICNIRP.

Wytyczne ICNIRP z 1998 r. zostały wykorzystane wprost w międzynarodowych wymaganiach prawnych dla państw Unii Europejskiej:

- w 1999 r. wykorzystano je w omówionym nieobligatoryjnym zaleceniu [Council of the European Union, 1999],
- w 2004 r. wykorzystano je w obligatoryjnej Dyrektywie [Dyrektywa, 2004].

Wytyczne z 1998 r. były sukcesywnie uzupełniane i nowelizowane przez ICNIRP:

- w 2009 r. w zakresie ochrony przed narażeniem na pole magnetostaticzne [ICNIRP, 2009],
- w 2010 r. w zakresie ochrony przed narażeniem na PEM o częstotliwości do 10 MHz [ICNIRP, 2010],
- w 2014 r. w zakresie ochrony przed zagrożeniem wynikającym z poruszania się podczas narażenia na pole magnetostaticzne [ICNIRP, 2014].

Ponadto w 2018 r. ICNIRP opublikowała projekt wytycznych radiofalowych dotyczących ochrony przed narażeniem na PEM o częstotliwości przekraczającej 100 kHz (International Commission on

Non-Ionizing Radiation Protection – „Draft ICNIRP Guidelines – Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields – 100 kHz to 300 GHz”) do konsultacji publicznych. Według aktualnych informacji o statusie tego projektu, upublicznionych podczas wystąpienia reprezentanta ICNIRP na konferencji zorganizowanej w Warszawie w grudniu 2018 r. przez Instytut Łączności, ICNIRP opracowuje wnioski z ponad tysiąca komentarzy nadesłanych z całego świata. Obecnie nie są dostępne informacje na temat finalnej wersji dyskutowanej nowelizacji wytycznych radiofalowych – komunikat na stronie domowej ICNIRP podaje, że ich publikacja planowana jest w połowie 2019 r. W związku z tym nie omawiamy zdezaktualizowanego projektu, którego dalsze losy są obecnie niepewne. Podkreślenia wymaga, że projekt poddany konsultacjom w 2018 r. różnił się od poprzedniej wersji prezentowanej w 2017 r. – skala dalszych, obecnie opracowywanych zmian nie została dotychczas podana do publicznej wiadomości.

Nowelizacja Dyrektywy Europejskiej 2004/40/WE, którą opublikowano w 2013 r. [Dyrektywa, 2013], nie korzysta wprost z wytycznych ICNIRP (opublikowanych w latach 1998 i dotyczących PEM o częstotliwości 1 Hz–300 GHz; 2009 – dotyczących pola magnetostaticznego; 2010 – zmieniających wytyczne dotyczące PEM o częstotliwości 1 Hz–10 MHz; 2014 – dotyczących pola magnetycznego o częstotliwości 0 Hz–1 Hz) zarówno w strukturze wymagań dotyczących zasad ochrony pracujących przed zagrożeniami elektromagnetycznymi, jak i w samych kryteriach oceny zagrożeń. Przykładowo w Dyrektywie 2013/35/UE określono limity narażenia na pole magnetyczne małych częstotliwości, które są wielokrotnie wyższe od limitów zaproponowanych w wytycznych ICNIRP z 2010 r., a w zakresie częstotliwości mikrofalowych wyznaczono limity SAR w węższym paśmie częstotliwości (100 kHz–6 GHz) niż w zaleceniach ICNIRP (100 kHz–10 GHz).

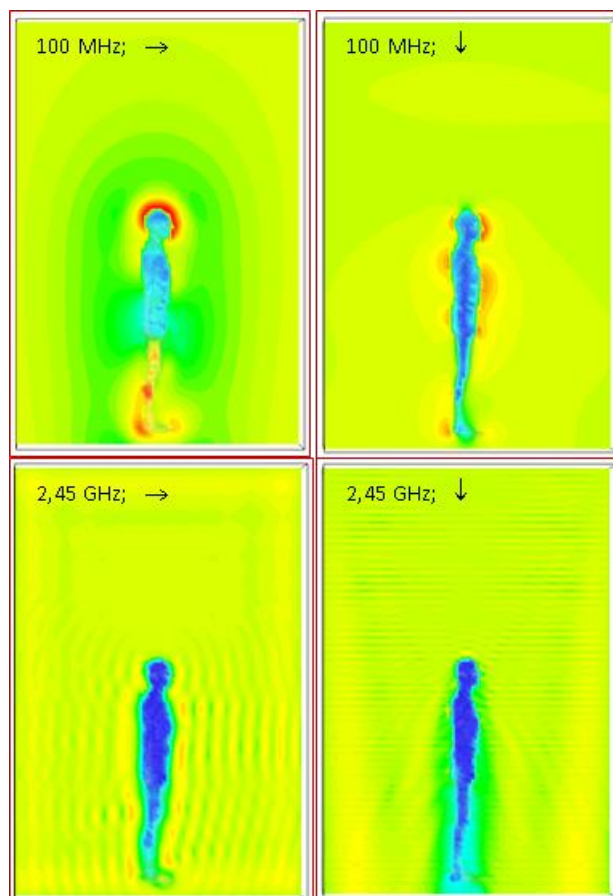
Również wytyczne ICNIRP z 2009 r. i z 2014 r. dotychczas nie zostały wprost wprowadzone do legislacji na poziomie Unii Europejskiej. Nie zmodyfikowano dotąd także Zalecenie 1999/519/WE (powstałego na podstawie wytycznych ICNIRP z 1998 r.), pomimo że ICNIRP opublikowała w 2010 r. nowe, istotnie zmienione wytyczne ochrony przed oddziaływaniem PEM o częstotliwościach nieprzekraczających 10 MHz na ludność i pracujących. W normach europejskich dotyczących oceny zagrożeń elektromagnetycznych jako kryteria oceny cytowane są europejskie wymagania prawne, tj. Zalecenie 1999/519/WE i Dyrektywa 2013/35/EU. Natomiast w normach międzynarodowych IEC (tj. opracowanych przez International Electrotechnical Commission) jako kryteria oceny cytowane są zarówno wytyczne ICNIRP, jak i inne wytyczne, takie jak Zalecenie 1999/519/WE i Dyrektywa 2013/35/EU, czy normy opracowane przez Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

#### 4.2.2. MIARY ZAGROZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W WYTYCZNYCH ICNIRP

Struktura miar narażenia na promieniowanie elektromagnetyczne i dotyczących ich limitów musi odzwierciedlać procesy biofizyczne związane z oddziaływaniem tego promieniowania na organizm. Do kluczowych zagadnień w tym zakresie należy uwzględnienie mechanizmów indukcyjnego i pojemnościowego sprzężenia obiektów materialnych z oddziaływującym na nie promieniowaniem elektromagnetycznym, które determinowane są m.in. przez długość fali promieniowania. Na rysunku 4.2.1 pokazano przykładowo zróżnicowanie skutków sprzężenia promieniowania o długości fali ok. 3 m (100 MHz) i ok. 12 cm (2,45 GHz) w przypadku napromieniowania pionowego i poziomego falą propagującą. W miarę wzrastania częstotliwości promieniowania mikrofalowego długość fali zmniejsza się do pojedynczych centymetrów, a następnie milimetrów (wynosząc 1 mm przy częstotliwości 300 GHz) – analiza mechanizmu sprzężenia się promieniowania z ciałem człowieka powinna uwzględniać coraz bardziej precyzyjne modele anatomiczne ciała i obliczenia komputerowe. Należy przy tym brać pod uwagę nie tylko długość fali promieniowania propagującego w powietrzu, ale również kilkukrotne zmniejszenie długości fali, która wnika do organizmu.

Do oceny zagrożeń elektromagnetycznych wynikających z oddziaływania promieniowania mikrofalowego na ciało człowieka wykorzystywane są miary charakteryzujące parametry energii padającej na powierzchnię ciała i pochłanianej w organizmie. Punktem wyjścia do analizy zagrożeń wynikających z absorpcji energii elektromagnetycznej w organizmie jest koncepcja wspomnianego już tutaj kilkakrotnie (definiowanego szczegółowo w rozdz. 3.1.2) parametru, określonego jako współczynnik szybkości pochłaniania właściwego energii (SAR). Współczynnik SAR został zdefiniowany jako szybkość, z jaką energia jest pochłaniana w jednostce masy tkanki ciała – wyraża się go w watach na kilogram [W/kg]. Współczynnik SAR jest powszechnie przyjętą miarą oddziaływania termicznego.

Rozwój koncepcji metod oceny wartości współczynnika SAR realizuje wspomniane wymagania dotyczące stopniowego zwiększania precyzji geometrycznej analizy tego parametru, odpowiadającej długości fali rozpatrywanego promieniowania, w powietrzu i w tkankach organizmu. Należy jednak podkreślić, że dotychczasowe metody badań konieczne do wymaganej precyzji oceny zagrożeń termicznych rozwijały się z pewnym opóźnieniem w stosunku do rozwoju techniki wprowadzającego do środowiska promieniowania mikrofalowe o coraz wyższych częstotliwościach.



Rys. 4.2.1. Sprężenia promieniowania elektromagnetyczne o długości fali ok. 3 m (100 MHz) i ok. 12 cm (2,45 GHz) w przypadku napromieniowania pionowego i poziomego falą propagującą [Zbiory wyników symulacji komputerowych CIOP-PIB]

Pierwszym etapem badań współczynnika SAR w kontekście oceny zagrożeń elektromagnetycznych była analiza wartości współczynnika SAR uśrednionego dla całego ciała i określenie dla niego limitów ochrony pracowników i ludności przed zagrożeniami elektromagnetycznymi. Współczynnik SAR uśredniony dla całego ciała ma zastosowanie głównie do oceny narażenia na promieniowanie o dużej jednorodności przestrzennej (czyli albo w dużej odległości od źródła promieniowania, albo w pobliżu źródła o dużych wymiarach). Dlatego jest to miara adekwatna do oceny narażenia w polu dalekim.

Analiza warunków narażenia w pobliżu źródła promieniowania mikrofalowego pozwala oszacować, czy dana instalacja jest bezpieczna (w kontekście uśrednionego obciążenia termicznego całego ciała). Za bezpieczne narażenie przyjmowano przypadek, w którym moc emitowana ze źródła była mniejsza od dopuszczalnej energii pochłoniętej w organizmie tzw. „standardowego” mężczyzny (o masie ciała 75 kg) przy limicie dotyczącym uśrednionego SAR = 0,4 W/kg. Przy narażeniu pracowników podczas emisji promieniowania o mocy 30 W, nawet pochłonięcie go w całości przez organizm człowieka przebywającego w pobliżu źródła nie spowoduje przekroczenia limitu SAR.

Podobna analiza, dotycząca narażenia dziecka o masie ciała 5 kg przy limicie  $SAR = 0,08 \text{ W/kg}$  – właściwym dla narażenia ludności – wykazuje już jedynie 0,4 W jako moc źródła bezpiecznego w każdych warunkach ekspozycji.

Jednakże pomimo spełnienia wymagań dotyczących wartości współczynnika SAR uśrednionego dla całego ciała, obserwowano poparzenia radiofalowe podczas narażenia w pobliżu źródła na promieniowanie o znacznej niejednorodności przestrzennej. Wykonane badania lokalnego oddziaływania termicznego w pobliżu źródeł, szczególnie tych małych, znajdujących się blisko ciała, wykazały potrzebę ograniczania również lokalnego SAR – uśrednianego w masie 10 g lub 1 g. Ustalenie odpowiednich limitów lokalnego SAR w głowie, tułowiu i kończynach doprowadziło do zweryfikowania poglądów na poziom mocy emitowanej z urządzenia, który można przyjąć za bezpieczny. Aktualne standardy dotyczące mocy promieniowania emitowanego przez anteny takich urządzeń jak modemy wi-fi, które mogą być użytkowane tuż przy ciele człowieka, dopuszczają emisję promieniowania o mocy rzędu 0,1–1 W, czyli 1–2 rzędy wielkości słabszą emisję ze źródła, niż wyniki analogicznej oceny według SAR uśrednionego.

Na podkreślenie zasługuje, że lokalny SAR, obecnie wykorzystywany jako miara skutków oddziaływania promieniowania mikrofalowego z pasma 100 kHz–10 GHz lub 100 kHz–6 GHz jest szacowany w stosunku do elementów ciała o masie 10 g, czyli sześciannu o boku ok. 20 mm.

Miara ta staje się nieadekwatna do oceny skutków ekspozycji na promieniowanie mikrofalowe o istotnie wyższych częstotliwościach, ponieważ w takim przypadku skutki termiczne ekspozycji koncentrują się przy powierzchni ciała – w skórze i gałkach ocznych – których wymiary przekraczają wspomnianą masę 10-gramową. Gałka oczna człowieka waży ok. 7 g, ma złożoną strukturę wewnętrzną i kształt zbliżony do kuli o średnicy ok. 23 mm. Natomiast zróżnicowana struktura wewnętrzna skóry obejmuje ok. 2–5 mm grubości, 3 warstwy (naskórek, skórę właściwą i tkanki podskórne), a także liczne struktury wewnętrzne (owłosienie, naczynia krwionośne, struktury nerwowe itd.). Z tego wynika, że analizy SAR 10 g dla oka i skóry są całkowicie nieadekwatne, ponieważ całe oko jest oceniane jedną, uśrednioną wartością SAR (pomimo znacznego zróżnicowania skutków termicznych w gałce ocznej o masie mniejszej od pojedynczej komórki wykorzystywanej w analizie SAR). Podobnie pojedyncze komórki obliczania SAR o wielkości ok. 20 mm są znacznie większe od grubości całej skóry, w której ze względu na złożoną budowę anatomiczną występują zróżnicowane skutki termiczne. Dlatego konieczne jest zrewidowanie ustaleń dotyczących bezpiecznej mocy promieniowania emitowanego w pobliżu człowieka i procedur oceny takiego zagrożenia.



Należy liczyć się z wynikami przyszłych (podejmowanych dopiero) badań dotyczących bardzo lokalnych skutków narażenia na EFM w stosunku do SAR/1 mg (tj. 1×1×1 mm objętości), wskazujących na konieczność obniżenia poziomu mocy promieniowania emitowanego przez urządzenia użytkowane przy ciele człowieka, którą traktuje się jaką bezpieczną, niewymagającą oceny zagrożeń przy urządzeniu i stosowania środków ochronnych. Podobnie jak w przypadku przejścia z uśredniania w masie 5–100 kg (całe ciało – od noworodków do dorosłych osób) do 10 g (czyli z rozdzielczością 10 tys. razy mniejszą) – między 10 g i 1 mg występuje podobne zróżnicowanie.

Obecnie dostępne modele numeryczne i moce obliczeniowe komputerów oraz dane dotyczące parametrów dielektrycznych poszczególnych rodzajów tkanek w paśmie częstotliwości 10–100 GHz, a także fizjologii gałki ocznej i skóry poddawanych narażeniu na promieniowanie mikrofalowe są niewystarczające do wykonania dostatecznie miarodajnej analizy wspomnianego SAR w masie 1 mg, zastępczo stosowana jest ocena zagrożeń analogiczna do pierwotnej analizy SAR średniego w całym ciele, tzn. poprzez ocenę poziomu emisji od źródła znajdującego się w pobliżu ciała bądź, nieco dokładniej, ocenę gęstości mocy promieniowania padającego na niewielkie fragmenty powierzchni ciała.

Biorąc pod uwagę rozwój metod oceny zagrożeń elektromagnetycznych, metodę średniego napromieniowania należy traktować jako uproszczoną i tymczasową (pamiętając o wnioskach, jakie spowodowały przejście z SAR uśrednionego dla całego ciała na SAR lokalny). W związku z najnowszymi wynikami badań [Wyde i wsp., 2018; Miller i wsp., 2018; Falcioni i wsp., 2018; Hinrikus i wsp., 2018] można przypuszczać, że aktualne zalecenia i metody oceny zagrożeń zostaną skorygowane, jako zbyt słabo chroniące osoby narażone na promieniowanie mikrofalowe. Krytyczne opinie dotyczące dotychczasowych zasad oceny narażenia lokalnego i impulsowego (np. o parametrach charakteryzujących narażenie prognozowane w związku z użytkowaniem projektowanych sieci 5G) pojawiają się coraz częściej w literaturze naukowej w wyniku prowadzonych badań wykorzystujących precyzyjniejsze modele numeryczne ciała człowieka (np. [Neufeld i Kuster, 2018; Foster i wsp., 2018]). Wypracowania ugruntowanych opinii środowiska naukowego na temat nowych limitów narażenia i zasad jego oceny, koniecznych dla zapewnienia bezpiecznego użytkowania projektowanych sieci 5G (szczególnie wykorzystujących nowe pasma częstotliwości przekraczające 6 GHz), można spodziewać się w perspektywie co najmniej kilkuletniej, kiedy zostaną opublikowane i przedyskutowane na forum naukowym analizy zespołów badawczych.

Należy zwrócić uwagę, iż omawiana analiza elektrodynamicznych skutków oddziaływania promieniowania mikrofalowego bazuje na prawach klasycznej elektrodynamiki. Precyzyjna analiza skutków oddziaływania promieniowania mikrofalowego powinna obejmować ponadto konsekwencje dla procesów biochemicznych, ich dynamiki i parametrów probabilistycznych, jakie opisują modele uwzględniające prawa elektrodynamiki kwantowej (wykorzystywanej m.in. w projektowaniu urządzeń elektronicznych pracujących w paśmie mikrofalowym).

Podkreślenia wymaga również fakt, że w procesie planowania legislacji dotyczącej ochrony ludzi przed oddziaływaniem promieniowania elektromagnetycznego na podstawie wyników teoretycznych rozważań na temat poziomów promieniowania, przy jakich występują zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia ludzi, konieczne jest uwzględnienie realnych możliwości zmierzenia poziomu promieniowania w miejscu przebywania ludzi (lub jego określenia na podstawie obliczeń komputerowych bądź analizy parametrów technicznych źródeł promieniowania). Wyniki pomiarów, o których wspominamy, obarczone są znaczną niepewnością (czyli możliwymi rozbieżnościami między wynikiem pomiaru i stanem faktycznym). Jest to spowodowane właściwościami stosowanej na całym świecie (również w Polsce) aparatury oraz wspomnianego wcześniej oddziaływania między promieniowaniem i obiektami materialnymi, a nawet powietrzem. Upraszczając ten złożony problem techniczny, można powiedzieć, że w warunkach laboratoryjnych, ze względu na niepewność pomiaru, przewidywany wynik wielokrotnych pomiarów danego poziomu promieniowania mikrofalowego, wykonanych nawet kosztowną aparaturą najwyższej jakości, to przedział  $\pm 10\%$  wartości średniej z tych wyników (jeśli prognozujemy zakres dla 75% wyników wielokrotnych pomiarów), ale już  $\pm 40\%$  od wartości średniej z tych wyników, jeśli prognozujemy zakres dla 99 % wyników wielokrotnych pomiarów. W razie użycia tańszej aparatury, ale również w warunkach terenowych (np. podczas kontroli poziomu ekspozycji ludności) należy uwzględnić co najmniej 2–3-krotnie większą niepewność. Może ona mieć duże znaczenie np. w wypadku rozstrzygania, czy poziom ekspozycji na promieniowanie mikrofalowe w przestrzeni publicznej jest zgodny z ograniczeniami dotyczącymi ludności, czy z ograniczeniami dotyczącymi pracowników. Podczas oceny narażenia typowym postępowaniem, ze względu na konieczność racjonalizacji kosztów nadzoru środowiskowego, jest wykonywanie nielicznych pomiarów. Wprowadzając robocze założenie dotyczące pewności rozstrzygnięcia (np. 99%), można oszacować niezbędną do tego niepewność pomiarową. Przy proponowanym przez ICNIRP niewielkim odstępnie limitów narażenia pracowników i ludności (np. dla zakresu 10–400 MHz:  $60 \text{ V/m} \div 27 \text{ V/m} = 2,2$ ), rozstrzygnięcie to wymaga 9% poziomu niepewności standardowej pomiaru. Tak precyzyjne pomiary w warunkach terenowych są

z perspektywy obecnie dostępnej aparatury pomiarowej niemożliwe do przeprowadzenia. Natomiast jeśli takie same wymagania postawimy systemowi, w którym wykorzystujemy limit ICNIRP określony dla narażenia pracowników w środowisku pracy (60 V/m), a niższym limitem dotyczącym ekspozycji ludności jest ten określony w Polsce dla ekspozycji w miejscach dostępnych dla ludności (7 V/m), przy ich krotności wynoszącej wówczas 8,5, wymagany poziom niepewności standardowej wyniesie 20%. W pomiarach terenowych jest to dosyć ambitne wymaganie – możliwe jednak do spełnienia z wykorzystaniem dobrej praktyki pomiarowej.

#### 4.2.3. ZAGROŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE UWZGLĘDNIONE W SYSTEMIE LIMITÓW ICNIRP

Wytyczne ICNIRP mają status i charakter raportu naukowego z arbitralnie przyjętą przez autorów metodą analizy danych naukowych charakteryzujących zagrożenia elektromagnetyczne i kryteriów wnioskowania. Członkowie ICNIRP zdecydowali o uwzględnieniu tylko takich skutków oddziaływania PEM, które charakteryzuje funkcyjna zależność skutek-poziom ekspozycji. Założyli, że PEM może oddziaływać jedynie deterministycznie, nieprzedstawiając dowodów na taką hipotezę. Omówione w rozdziale 3. dowody naukowe przemawiają za bardziej zróżnicowanymi mechanizmami oddziaływania. Ponadto spośród różnorodnych zagrożeń związanych z oddziaływaniem PEM wskazali kryteria oceny zagrożeń jedynie dla wybranych rodzajów (tabela 4.2.1), nieuwzględniając m.in. groźnych dla zdrowia i życia ludzi zagrożeń pośrednich i szczególnych wymagań koniecznych dla ochrony użytkowników implantów medycznych.

Tab. 4.2.1. Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia zależne od skutków oddziaływania promieniowania mikrofalowego, których rozpoznanie, ocena i ograniczanie jest konieczne w środowisku [Dyrektywa, 2013] i uwzględnienie ich w systemie limitów zaproponowanym przez ICNIRP

Lp.	Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia związane z oddziaływaniem promieniowania mikrofalowego (patrz tabela 4.1.1)	Czy zagrożenie zostało uwzględnione przy opracowywaniu limitów ICNIRP
wynikające ze skutków biofizycznych bezpośredniego oddziaływania PEM na organizm człowieka, które obejmują indukowane w organizmie pole elektryczne i prąd elektryczny:		
1.	zakłócenia naturalnych procesów elektrofizjologicznych w organizmie	nieuwzględnione
2.	skutki termiczne (wzrost temperatury tkanek) na powierzchni ciała lub wewnątrz organizmu	uwzględnione
wynikające z pośrednich skutków oddziaływania PEM na obiekty materialne, które mogą spowodować:		
3.	zakłócenia działania elektronicznego sprzętu medycznego i aktywnych implantów medycznych (elektronicznych)	nieuwzględnione
4.	skutki termiczne oddziaływania PEM na pasywne implanty medyczne (mechaniczne)	nieuwzględnione
5.	uruchomienie elektrycznych urządzeń inicjujących detonację materiałów wybuchowych	nieuwzględnione
6.	zapłon materiałów łatwopalnych lub atmosfer wybuchowych wskutek oddziaływania wyładowania elektrostatycznego lub wyładowania iskrowego w obiektach technicznych, spowodowanego prądem indukowanym lub prądem kontaktowym stanu przejściowego	nieuwzględnione
7.	prądy kończynowe kontaktowe – prądy przepływające w kończynach podczas oddziaływania PEM i dotykania obiektów materialnych	nieuwzględnione

## 5. OCENA WARTOŚCI POLSKICH LIMITÓW EKSPOZYCJI ZAWODOWEJ

### I ŚRODOWISKOWEJ NA PEM EMITOWANE PRZEZ URZĄDZENIA SYSTEMU 5G NA TLE PRZEPISÓW EUROPEJSKICH

Ochrona przed niepożądanym oddziaływaniem PEM w Polsce obejmuje zarówno ochronę ludności, jak i pracowników ekspozowanych zawodowo, co określają ustawy:

- Prawo ochrony środowiska: Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. nr 62, poz. 627, 2001, z późn. zm.). Dział VI: Ochrona przed polami elektromagnetycznymi);
- Kodeks Pracy: Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. (tekst jedn.: Dz. U. nr 21, poz. 94, 1998, z późn. zm.). Dział dziesiąty – Bezpieczeństwo i higiena pracy. Rozdział VI Profilaktyczna ochrona zdrowia – Art. 227 i 228).

Szczegółowo oba rodzaje ochrony regulowane są przepisami wykonawczymi:

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. nr 192, poz. 1883, 2003). Wymagania tego rozporządzenia określają najważniejsze aspekty ochrony przed oddziaływaniem PEM w miejscach dostępnych dla ludności, w tym precyzują, jakie obiekty emitujące PEM podlegają ocenie, kiedy należy wykonywać pomiary PEM, metodykę pomiarów oraz wartości dopuszczalnych pól w środowisku;
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. nr 33, poz. 166, 2011). Rozporządzenie to reguluje częstotliwość wykonywania pomiarów oraz jednostki upoważnione do wykonywania pomiarów w środowisku pracy;
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 3 lipca 2018 r. (Dz. U., poz. 1286, 2018) w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy;
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pola elektromagnetyczne (tekst jedn.: Dz. U., poz. 331, 2018). Rozporządzenie określa wymagania dotyczące rozpoznawania obiektów technicznych emitujących PEM, mające wpływ na bezpieczeństwo i higienę pracy, miar oraz limitów do oceny bezpośrednich skutków narażenia pracującego na PEM, środków ochronnych stosowanych w celu zapobiegania zagrożeniom elektromagnetycznym, tj. szkodliwym dla zdrowia, niebezpiecznym lub

uciążliwym skutkom bezpośredniego lub pośredniego oddziaływania PEM w środowisku pracy, gdzie rozpoznano możliwość narażenia na PEM w środowisku pracy.

Zarówno przepisy „środowiskowe” jak i „zawodowe” obejmują interesujący nas zakres częstotliwości, tj. 15–100 GHz.

Analogiczny podział na ekspozycję „zawodową” i „środowiskową” dotyczy przepisów Unii Europejskiej. Należy jednak jeszcze raz podkreślić, że o ile istnieją obowiązujące minimalne wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników narażonych na zagrożenia spowodowane PEM w postaci Dyrektywy 2013/35/EU [Dyrektywa, 2013], to nie istnieje w UE akt prawny tej rangi dotyczący ochrony ludności (populacji ogólnej). W 1999 r. ukazały się jedynie zalecenia Rady Europy dotyczące środowiskowego ograniczenia ekspozycji populacji na PEM [Council Recommendation, 1999].

Polskie przepisy „środowiskowe” [Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2003] dla pola o częstotliwości 0,3–300 GHz określają wartość dopuszczalną natężenia pola elektrycznego (którą zgodnie z nomenklaturą z rekomendacji Rady Europy można nazwać poziomem referencyjnym) w miejscach dostępnych dla ludności wynoszącą 7 V/m (wartość skuteczna) lub dla gęstości mocy mikrofalowej 0,1 W/m<sup>2</sup>.

Przepisy „zawodowe” [Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej, 2018] jako górną granicę strefy bezpiecznej [czyli przestrzeni pracy, w której nie stosuje się środków ochronnych ze względu na niepożądane oddziaływanie PEM oraz nie ogranicza się dostępu żadnych osób (np. młodocianych czy kobiet w ciąży)] w zakresie 10 MHz–300 GHz również ustaliły na 7 V/m (dzięki czemu są zgodne z przepisami „środowiskowymi”). Jednakże zgodnie z filozofią polskich przepisów zawodowych za poziom referencyjny można uznać limit operacyjny bazowy IPNob-E (ekspozycja, jakiej może podlegać przez 8 godz. dziennie uprawniony do pracy w PEM pracownik). W zakresie 100 MHz–300 GHz wynosi on 60 V/m (wartość równoważna natężenia pola elektrycznego, która dla sygnałów ciągłych harmonicznym odpowiada wartości skutecznej). Dla PEM w zakresach częstotliwości emitowanych przez urządzenia systemu 5G, w przepisach i zaleceniach unijnych [Dyrektywa, 2013; Council Recommendation, 1999], poziomy referencyjne, nazywane w Dyrektywie Interwencyjnymi Poziomami Narażenia (IPN), są różne dla różnych elementów składowych systemu. Dla tych, które emitują pole z zakresu 400–2000 MHz wartość poziomu referencyjnego nie jest stała – dla ekspozycji zawodowej opisywana jest przy pomocy wzoru  $IPN(E) = 3 \cdot f^{1/2}$  [V/m], czyli wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego od 60 V/m do ok. 140 V/m, natomiast z zakresu 2–300 GHz poziom referencyjny wynosi 140 V/m. Dla ekspozycji

środowiskowej poziomy referencyjne to, odpowiednio:  $E = 1,375 \cdot f^{1/2}$  [V/m] (27–60 V/m) w zakresie 400–2000 MHz i 61 V/m w zakresie 2–300 GHz.

Porównanie polskich aktów prawnych z przepisami i zaleceniami UE wskazuje na różnice w sposobie oceny narażenia w przypadku PEM emitowanego przez urządzenia systemu 5G. Zgodnie z Dyrektywą UE w przypadku jednoczesnej ekspozycji na pola o różnych częstotliwościach należy zastosować wzór:

$$\sum_{i=30\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \frac{E_{\text{inc},i}^2}{E_{\text{inc},L,i}^2} \leq 1 \quad (5.1)$$

gdzie:  $E_{\text{inc},i}$  – natężenie pola elektrycznego dla promieniowania o częstotliwości  $i$ ,  $E_{\text{inc},L,i}$  – poziom referencyjny natężenia pola elektrycznego dla promieniowania o częstotliwości  $i$ .

Wzór ten jest analogiczny dla rekomendacji unijnych, z tym że w tych ostatnich obowiązuje już dla częstotliwości powyżej 1 MHz, a nie powyżej 30 MHz. Wynika z niego, że ze względu na funkcyjną zależność  $E_{\text{inc},L,i}$  od częstotliwości w zakresie 400–2000 MHz w celu oceny narażenia należy wykonywać pomiary selektywne, a zmierzoną wartość natężenia pola elektrycznego porównywać z odpowiednimi poziomami referencyjnymi lub wykonywać pomiary sondą o kształtowanej charakterystyce częstotliwościowej dopasowanej do wytycznych europejskich. Przyjmując, że anteny nadawcze systemu 5G będą emitowały pola o częstotliwościach 700 MHz, 3,5 GHz, 26 GHz, dla rekomendacji unijnych wzór powyższy przechodzi w:

$$\left(\frac{E_{z\text{m},700\text{MHz}}}{36}\right)^2 + \left(\frac{E_{z\text{m},2\text{GHz}-30\text{GHz}}}{60}\right)^2 \leq 1 \quad (5.2)$$

gdzie:  $E_{z\text{m}}$  – zmierzona wartość natężenia pola elektrycznego.

W „środowiskowych” przepisach polskich analogiczny wzór będzie miał postać:

$$\left(\frac{E_{z\text{m},700\text{MHz}-30\text{GHz}}}{7}\right)^2 \leq 1 \quad (5.3)$$

gdzie:  $E_{z\text{m}}$  – wynik pomiaru szerokopasmowego natężenia pola elektrycznego w zakresie 700 MHz–30 GHz.

Porównanie wzorów (5.2) i (5.3) pokazuje, że dla natężenia pola elektrycznego polskie przepisy „środowiskowe” są ok. 5–10 razy restrykcyjne niż rekomendowane przez UE. A zatem często używany przez przeciwników polskich przepisów „środowiskowych” argument mówiący, że nasze przepisy są 100-krotnie „ostrzejsze” od zaleceń europejskich, jest nieprawdziwy – powstał zapewne z porównywania gęstości mocy mikrofalowej przy jednoczesnym niejednoznacznym czy

wręcz błędnym określaniu „dopuszczalne poziomy PEM”. Wynika to z faktu, że limit środowiskowy dotyczy pola elektrycznego, ponieważ tylko ten parametr może być w praktyce mierzony [V/m] – gęstość mocy mikrofalowej [W/m<sup>2</sup>] jest stosowana jedynie jako ekwiwalent dla strefy dalekiej, a nie jest mierzona faktycznie.

Podobne zjawisko występuje dla ekspozycji zawodowej. Wytyczne Dyrektywy wyrażone w wartościach natężenia pola elektrycznego opisane będą wzorem:

$$\left(\frac{E_{zm,700MHz}}{80}\right)^2 + \left(\frac{E_{zm,2GHz-30GHz}}{140}\right)^2 \leq 1 \quad (5.4)$$

natomiast przepisy polskie wzorem:

$$\left(\frac{E_{zm,700MHz-30GHz}}{60}\right)^2 \leq 1 \quad (5.5)$$

czyli są ok. 1,5–2,5 razy bardziej restrykcyjne.

Należy jednak podkreślić, że przyjęcie przepisów bardziej restrykcyjnych niż minimalne wymagania (czy rekomendacje) UE jest jak najbardziej zgodne z obowiązującą w niej zasadą ostrożności. Przywołuje się ją, zgodnie z interpretacją KE, gdy zjawisko, produkt lub działanie może stanowić potencjalne zagrożenie, zidentyfikowane w ramach naukowej i obiektywnej oceny, jeżeli taka ocena nie pozwala na określenie z wystarczającą pewnością tego zagrożenia. Wyrazem tego jest Opinia Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego na temat wniosku dotyczącego Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta Dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 Dyrektywy 89/391/EWG) (Dz.U.UE C z dnia 15 lutego 2012 r.). Na jej podstawie Zgromadzenie Parlamentarne Rady Europy przyjęło Rezolucję 1815 [Rezolucja, 2011], w której „w odniesieniu do norm i progów dotyczących emisji pól elektromagnetycznych wszystkich rodzajów i wszystkich częstotliwości [...] zaleca zastosowanie zasady ostrożności i ALARA (*as low as reasonably achievable*), tj. najniższy poziom, jaki można racjonalnie osiągnąć”. W rezolucji stwierdza się również, że „zasada ostrożności powinna mieć zastosowanie, jeśli ocena naukowa nie pozwala stwierdzić z wystarczającą pewnością, czy istnieje ryzyko” dotyczące zdrowia ludzkiego. Zalecenia zostały sformułowane „z uwzględnieniem nie tylko skutków zwanych cieplnymi, lecz także innych niż cieplne lub biologicznych skutków emisji czy promieniowania pól elektromagnetycznych”. Trzeba działać, ponieważ „zważywszy na coraz większe narażenie ludności [...] koszt ekonomiczny i ludzki niepodjęcia działań mógłby być bardzo wysoki, gdyby wczesne ostrzeżenia zostały zlekceważone”. W rezolucji podkreśla się także, że ekspertyzy naukowe muszą



być niezależne i absolutnie wiarygodne, tak aby można było dysponować „przejrzystą i obiektywną oceną potencjalnie szkodliwych skutków dla środowiska naturalnego i zdrowia ludzkiego”. Wreszcie apeluje się o ponowne rozważenie „podstawy naukowej aktualnych, ustalonych przez ICNIRP norm w zakresie narażenia na pola elektromagnetyczne, które to normy mają poważne ograniczenia”.

Komisja Europejska odniosła się do niej w odpowiedzi pisemnej na pytanie parlamentarne z 1 października 2011 r.:

„Przedmiot: Potrzeba nowej Dyrektywy w sprawie pól elektromagnetycznych (EMF) i zakazu wi-fi w szkołach w UE”. Na spotkaniu w maju w Kilonii Zgromadzenie Parlamentarne Rady Europy przyjęło rezolucję 1815 (2011), w której uznano, że istnieją wystarczające dowody na potencjalnie szkodliwy wpływ pól elektromagnetycznych (EMF) na środowisko i zdrowie ludzkie. W dokumencie tym Rada zaproponowała, aby jej państwa członkowskie podjęły środki dotyczące korzystania z telefonów komórkowych i sieci wi-fi, a także zwróciły się z prośbą o zakaz stosowania takich urządzeń w szkołach.

Rezolucja Rady Europy została oparta na wnioskach z raportu BioInitiative, sporządzonego przez 26 ekspertów naukowych z tej dziedziny, którzy dokonali przeglądu ponad 1 500 najnowszych badań naukowych. W raporcie stwierdzono, że konieczne jest zrewidowanie dopuszczalnych poziomów narażenia i decyzji w zakresie polityki publicznej dotyczących wpływu pól elektromagnetycznych na zdrowie.

Wcześniej, w rezolucji przyjętej na sesji plenarnej w kwietniu 2009 r., Parlament Europejski już poprosił Komisję o przedłożenie Dyrektywy UE, która wykraczałaby poza przepisy zalecenia Rady 1999/519 / WE w zakresie ustanawiania bardziej rygorystycznych i wiążących poziomów narażenia dla wszystkich urządzeń transmitujących EMF w zakresie częstotliwości od 0,1 MHz do 300 GHz.

1. Co Komisja myśli o wnioskach z raportu BioInitiative, który posłużył jako podstawa do uchwały Rady Europy w sprawie wiążących limitów emisji elektromagnetycznych?
2. W jaki sposób Komisja zastosowała się do wniosku złożonego przez Parlament w rezolucji z kwietnia 2009 r.?
3. Czy Komisja ma jakiegokolwiek plany ograniczenia emisji częstotliwości pola elektromagnetycznego za pomocą wiążącej Dyrektywy?

Odpowiedź Komisji:

1. Raport BioInitiative jest kompilacją indywidualnych wniosków z niewielkiego badania naukowców, które nie ujawniło żadnych nowych wyników badań i nie zapewniało pełnego przeglądu dostępnej literatury naukowej w momencie jej publikacji w 2007 r. Naukowe recenzje

tego raportu z różnych zaufanych źródeł na całym świecie, w tym z Rady Zdrowia Holandii, wskazują na poważne wady i niespójności naukowe.

2. Od czasu przyjęcia w kwietniu 2009 r. Przez Parlament Europejski rezolucji w sprawie problemów zdrowotnych związanych z polami elektromagnetycznymi, Komisja kontynuowała finansowanie badań w tej dziedzinie i rozpoczęła dialog z zainteresowanymi stronami. Komisja nadal monitoruje dowody naukowe dotyczące tej kwestii. Komisja zorganizuje następnie konferencję naukową w dniach 16–17 listopada 2011 r. w sprawie skutków zdrowotnych pól elektromagnetycznych i zwróci się do Komitetu Naukowego ds. Pojawiających się i Nowo Rozpoznanych Zagrożeń dla Zdrowia o ponowne rozpatrzenie stanowiska w tej sprawie.

3. Zgodnie z Traktatem państwa członkowskie są odpowiedzialne za ochronę zdrowia publicznego, a Unia nie ma kompetencji prawnych do wydawania wiążących przepisów dotyczących negatywnych skutków zdrowotnych pól elektromagnetycznych. Rada przyjęła zalecenie 1999/519/WE, aby zapewnić państwom członkowskim niewiążące wspólne ramy limitów ekspozycji, mające na celu zapewnienie wysokiego poziomu ochrony zdrowia.

Jednak producenci i operatorzy sprzętu telekomunikacyjnego w UE muszą przestrzegać Dyrektywy 1999/5/WE. Zharmonizowane normy techniczne zapewniające domniemanie zgodności z niniejszą Dyrektywą mają na celu zapewnienie, że narażenie obywateli na pola elektromagnetyczne nie przekracza limitów zaproponowanych w zaleceniu Rady”  
[<http://www.europarl.europa.eu/sides/getAllAnswers.do?reference=E-2011-009531&language=EN>].

## 6. PODSUMOWANIE

Zgodnie ze Strategią na Rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju już w 2020 r. przynajmniej w 1 mieście w Polsce zostanie wprowadzony system 5G telefonii komórkowej, który następnie obejmie obszar całego kraju. W Polsce przewidywane jest wykorzystanie w tym systemie promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach 700 MHz, 3,4–3,8 GHz i 26 GHz. Oczywiście, jak każda technologia powodująca emisję promieniowania elektromagnetycznego do środowiska, również system 5G budzi zaniepokojenie znacznej części społeczeństwa, głównie możliwością jego negatywnego wpływu na zdrowie. O ile wiedza dotycząca promieniowania z dwóch pierwszych zakresów jest już częściowo spopularyzowana, o tyle EFM (w tym interesujący nas zakres 15–100 GHz), a zwłaszcza ich biologiczne działanie są w społeczeństwie praktycznie zupełnie nieznanne. Niestety trzeba stwierdzić, że być może ze względu na stosunkowo niewielkie dotychczasowe ich wykorzystanie, niewiele jest również badań dotyczących tego zagadnienia – a już zupełnie brak jest opracowań dotyczących wpływu chronicznie działających słabych EFM. W niniejszym Raporcie staraliśmy się – na podstawie analizy dostępnych wyników badań – przedstawić obiektywny obraz współczesnej wiedzy o biologicznym działaniu EFM oraz jej istotne ograniczenia.

Ze względu na długość fali promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach 15–100 GHz energia przez nią niesiona jest pochłaniana głównie w tkankach zewnętrznych o grubości co najwyżej kilku milimetrów, co w praktyce powoduje najsilniejsze oddziaływanie w obrębie skóry i oczu. Nie oznacza to oczywiście, że można uznać EFM za mniej szkodliwe niż PEM niższych częstotliwości, istotnie wnikające w głąb ciała człowieka i sięgające organów wewnętrznych. Każde bowiem zaburzenie funkcjonowania skóry może mieć dla organizmu znaczące konsekwencje.

Zgodnie z prawami fizyki pochłonięta energia elektromagnetyczna jest zamieniana na inne rodzaje energii, w tym na energię kinetyczną cząsteczek, z których zbudowany jest napromieniowywany obiekt. Wpływa to na zmiany w ich pierwotnym ruchu, co może powodować ich tarcie i – będące jego skutkiem – ogrzewanie prowadzące do efektów biologicznych (efekt termiczny) oraz zmiany w ich wzajemnym położeniu, co może inicjować tzw. efekty nietermiczne. Ze względu na prognozowane na podstawie dostępnych specyfikacji technicznych stosunkowo niewielkie wartości PEM w miejscach przebywania ludzi, najbardziej interesujące są ewentualne efekty nietermiczne. O możliwości biologicznego działania EFM mogą świadczyć starsze badania, na podstawie których opracowano terapię przy użyciu tych fal, potwierdzone również z zastosowaniem najnowszych metod badawczych.

Wyniki badań wskazują na możliwość wystąpienia efektów działania EFM ze strony układu nerwowego. Do wyjaśnienia wyników proponuje się 2 modele: bezpośrednią aktywację komórek

skóry (keratynocyty i/lub mastocyty), które indukują wydzielanie cząsteczek czynników sygnałowych w ogólnym krążeniu krwi, i stymulację obwodowego układu nerwowego, który z kolei aktywuje centralny układ nerwowy i indukuje wydzielanie peptydów opioidowych. Wykazano także, że ekspozycja na EMF może wpływać na ekspresję genów i proliferację komórek, przy czym większość badaczy skłania się ku pogładowi o termicznym ich podłożu, chociaż istnieją prace wskazujące ewentualny mechanizm nietermiczny. Większość prac dotyczących ewentualnej genotoksyczności ekspozycji na EFM zaprzecza takiemu działaniu. Obecnie nie ma danych wskazujących na to, by zaburzenia funkcjonowania oka miały naturę nietermiczną; nie należy więc prawdopodobnie spodziewać się ich w przypadku ekspozycji na PEM emitowane przez urządzenia systemu 5G.

Należy jednak podkreślić, że zdecydowana większość badań dotyczy nietermicznego wpływu EFM na własności błon komórkowych (w tym pobudliwych) i obejmuje zakres promieniowań o gęstościach mocy padających znacznie (niekiedy ponad 10-krotnie) wyższych niż te, z jakimi prawdopodobnie będziemy mieli do czynienia podczas powszechnego użytkowania systemów 5G. Jednak istnieją prace, w których obserwowano wpływ zdrowotny niewielkich ekspozycji, jak te związane z antenami 5G, chociaż z uwagi na wspomniane wyżej błędy metodologiczne i sposób eksponowania (ekspozycja miejscowa) wymagałyby one powtórzenia dla warunków takich, jakie będą występowały w realiach systemu 5G. Niestety ze względu na wspomniany już brak badań skutków ekspozycji chronicznej na EFM na zdrowie obecnie nie można ocenić potencjalnych zagrożeń zdrowia, jakie mogą być z nim związane.

Nie są również dostępne wyniki badań wpływu EFM na użytkowników implantów medycznych. W tym zakresie można byłoby się powoływać na badania odporności elektromagnetycznej (EMC), ale obecnie nie istnieją wymagania badań EMC dla promieniowania o częstotliwościach przekraczających 2,7 GHz. Ze względu na zwiększającą się wraz ze wzrostem częstotliwości wrażliwość na zakłócenia można spodziewać się, że dla niektórych urządzeń elektronicznych limity odporności dla wyższych częstotliwości będą niższe niż obecnie obowiązujące dla częstotliwości do 2,7 GHz (3–10 V/m).

Z naszego Raportu wynika, że bardzo istotne dla spodziewanych skutków biologicznych będą wartości PEM w otoczeniu anten nadawczych – w analizowanym przez nas przypadku anten emitujących EFM. Wiąże się z tym także problem możliwości dotrzymania przez operatorów limitów PEM, ustalonych w Polsce dla ochrony ludzi i środowiska. Ze względu na właściwości EFM (w tym 26 GHz), m.in. bardzo szybkiego pochłaniania ich przez powietrze i obiekty znajdujące się na drodze propagacji, anteny je emitujące muszą znajdować się nie rzadziej niż co 200–250 m (na

terenach o zapotrzebowaniu na bardzo wysoką przepustowość przesyłanych danych mogą to być nawet wielokrotnie mniejsze odległości, rzędu kilkudziesięciu metrów), a więc będą bardzo liczne. Analiza klas zewnętrznych stacji bazowych zgodnie z 3GPP TR 38.873 (2017) (dla komórek UMa i UMi z antenami odpowiednio na 25 m n.p.t. i 10 m n.p.t.) pokazuje, że nawet dla anten z wiązkami kierowanymi oświetlającymi stosunkowo małe obszary bardzo blisko stacji bazowej (nawet 10 m w rzucie poziomym od anteny stacji bazowej dla UMa i 5 m dla UMi) dopuszczalne EIRP anten na oświetlanym obszarze wiązki głównej wynosi nie mniej niż 60 dBm dla UMa i 50 dBm dla UMi. Dla odległości na granicy komórek jest to odpowiednio 80 dBm (czyli ok. 100 kW) dla UMa i 72 dBm (ok. 16 kW) dla UMi.

Podsumowując przeprowadzone analizy, można stwierdzić, że przy racjonalnym sterowaniu mocą sygnału dla wiązek śledzących użytkowników istnieje możliwość zachowania standardów ochrony środowiska obowiązujących w Polsce (7 V/m) w pasmach do 40 GHz, a powyżej – nawet w najgorszym przypadku – przy pełnej dopuszczalnej mocy i dla punktu obserwacji odległego o 5 m od podstawy anteny pozostaje ok. 10 dB marginesu dopuszczalnej ekspozycji. Jeżeli przyjmie się, że wiązki nie będą sterowane, a jedynie ustawione tak, żeby maksimum energii trafiało na granicę komórki UMa, to nawet przy maksymalnych wartościach EIRP według FCC [FCC, 2016] standardy środowiska będą spełnione dla kanału o  $B = 400$  MHz dla częstotliwości poniżej 40 GHz, a dla komórek UMi – przyjmując, że mikrokomórki pracować będą w pasmach powyżej 40 GHz – zapas wynosi ok. 30 dB. Oczywiście jest to sumaryczna wartość EIRP „oświetlająca” dany punkt/obszar od wszystkich systemów, zarówno istniejących jak i planowanych, i może się zdarzyć, że będą miejsca, w których nastąpi kumulacja pól różnych systemów/operatorów. Należy pamiętać, że anteny systemu 5G będą charakteryzować się bardzo wąskimi wiązkami promieniowania, i obszar, na którym poziom natężenia pola będzie spadał o 3 dB, będzie miał zasięg co najwyżej kilkunastu metrów, ale na granicy zasięgu komórki, a więc co najmniej kilkadziesiąt metrów od anten.

**Na podstawie analizy dostępnych – choć nielicznych – danych o potencjalnych zagrożeniach dla zdrowia można stwierdzić, że nie ma dowodów na negatywne skutki zdrowotne ekspozycji na EFM o wartościach, jakie spodziewane są na podstawie szacunkowych danych technicznych wokół urządzeń nadawczych systemów 5G. Nie mniej ze względu na dane wskazujące istnienie mechanizmów biofizycznych, mogących do takich skutków prowadzić, konieczne wydaje się stosowanie przy planowanej eksploatacji takich systemów zasady ostrożności i zasady ALARA (najmniejszej dawki realnie możliwej), przynajmniej do czasu uzyskania wyników badań, które pozwolą na bardziej obiektywne ustosunkowanie się do tego problemu. Jest to ważne**

szczególnie w kontekście narażenia przewlekłego (długotrwałego/wieloletniego), a także narażenia zróżnicowanej pod względem statusu zdrowotnego populacji.

DYREKTOR  
  
prof. dr hab. med. Konrad Rydzicki

## 7. PIŚMIENNICTWO

- 3GPP TR 22.861 V14.1.0 (2016-09), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers for Massive Internet of Things; Stage 1 (Release 14).
- 3GPP TR 22.862 V14.1.0 (2016-09) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers for Critical Communications; Stage 1 (Release 14).
- 3GPP TR 22.863 V14.1.0 (2016-09) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers - Enhanced Mobile Broadband; Stage 1 (Release 14).
- 3GPP TR 22.864 V15.0.0 (2016-09) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers - Network Operation; Stage 1 (Release 15).
- 3GPP TR 22.891 V14.2.0 (2016-09), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers; Stage 1 (Release 14).
- 3GPP TR 36.873 V12.7.0 (2017-12), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on 3D channel model for LTE (Release 12).
- 3GPP TR 38.802 V14.2.0 (2017-09) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects (Release 14).
- 3GPP TR 38.804 V14.0.0 (2017-03) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on New Radio Access Technology; Radio Interface Protocol Aspects (Release 14)
- 3GPP TR 38.900 V14.1.0 (2016-09) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz(Release 14)
- 3GPP TR 38.913 V15.0.0 (2018-06) Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 15).

- 3GPP TS 38.104 V15.3.0 (2018-09) Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15).
- 5G Channel Model for bands up to 100 GHz, dokument zbiorowy opracowany przez: Aalto University, AT&T, BUPT, CMCC, Ericsson, Huawei, Intel, KT Corporation, Nokia, NTT DOCOMO, New York University, Qualcomm, Samsung, University of Bristol, University of Southern California, 4th International Workshop on 5G/5G+ Communications in Higher Frequency Bands (5GCHFB), Marina Bay Sands, Singapur, Dec. 4th, 2017.
- Adesoye S. Adegoke, „Measurement of propagation loss in trees at SHF frequencies”, PhD thesis, University of Leicester, Department of Engineering, 2014.
- Alekseev S.I, Ziskin M.C., Kochetkova N.V., Bolshakov M.A.: Millimeter Waves Thermally Alter the Firing Rate of the Lymnaea Pacemaker Neuron. *Bioelectromagnetics* Volume 18, Issue 2, 1997, Pages 89-98.
- Andersson S. et. al., „Design considerations for 5G mm Wave receivers”, Ericsson AB 2017, 22.06.2017. Dostępny pod adresem: [https://flex5gware.eu/images/08\\_Design\\_Considerations\\_for\\_5G\\_mmWave\\_Receivers.pdf](https://flex5gware.eu/images/08_Design_Considerations_for_5G_mmWave_Receivers.pdf) (ostatni dostęp: 09.11.2018).
- Bakaliuk T.G., Zoria L.V., Pogorila M.A.: Microwave resonance therapy in primary osteoarthritis: the pathogenetic validation of its clinical use. *Patol Fiziol Eksp Ter.* 1998,4:22–5.
- Belyaev IY, Alipov YD, Shcheglov VS., Chromosome DNA as a target of resonant interaction between *Escherichia coli* cells and low-intensity millimeter waves. *Electro- & Magnetobiology* 1992.11:97-108.
- Bem D.J., *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1973.
- Beneduci A., Chidichimo G., Tripepi S., Perrotta E. Cufone F.: Antiproliferative effect of millimeter radiation on human erythromyeloid leukemia cell line K562 in culture: Ultrastructural- and metabolic-induced changes. *Bioelectrochemistry.* 2007 May,70(2):214-20.
- Beneduci A: Evaluation of the potential in vitro antiproliferative effects of millimeter waves at some therapeutic frequencies on RPMI 7932 human skin malignant melanoma cells. *Cell Biochem Biophys.* 2009,55(1):25-32.
- Benson V.S., Pirie K., Schüz J., Reeves G.K., Beral V., Green J.; Million Women Study Collaborators. Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancers:prospective study. *Int J Epidemiol.* 2013 Jun;42(3):792-802. doi:10.1093/ije/dyt072.



- Betzalel N, Ben Ishai P, Feldman Y. The human skin as a sub-THz receiver - Does 5G pose a danger to it or not? *Environ Res.* 2018 May;163:208-216. doi:10.1016/j.envres.2018.01.032
- Betzalel N., Feldman Y., Ishai P. The Modeling of the Absorbance of Sub-THz Radiation by Human Skin. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 2017.: 1-8.
- Bieńkowski P. i wsp., Narażenie na pole elektromagnetyczne w przestrzeni pracy podczas użytkowania urządzeń nadawczych systemów radiokomunikacyjnych. Metoda pomiaru pola elektromagnetycznego in situ – wymagania szczegółowe, *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 2017, nr 2(92), 89-131.
- Bieńkowski P., Karpowicz J., Kieliszek J., Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 2016, nr 4(90), 41-74.
- Biofizyka, Podręcznik dla studentów, red. F. Jaroszyk, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa, 2008.
- Blank M, Goodman R., DNA is a fractal antenna in electromagnetic fields (EMF). *Int. J. Radiation Biol* 2011.87: 409-15
- Blank, M. Evidence for stress response (stress proteins). In: Sage, C., Carpenter, D., eds. *BioInitiative Report: A Scientific Perspective on Health Risk of Electromagnetic Fields*. 2007. Section 7, pp. 1–40. Published Online 31 August 2007 <http://www.bioinitiative.org/report/index.htm>
- Blick, D. W.; Adair, E. R.; Hurt, W. D.; Sherry, C. J.; Walters, T. J.; Merritt, J. H. Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin. *Bioelectromagnetics* 18:403-409; 1997.
- Bortkiewicz A, Gadzicka E, Szymczak W. Mobile phone use and risk for intracranial tumors and salivary gland tumors - A meta-analysis. *Int J Occup Med Environ Health.* 2017;30(1):27-43. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00802. Erratum in: *Int J Occup Med Environ Health.* 2017;30(4):685
- Bracken-Roche D, Bell E, Macdonald ME, Racine E. The concept of 'vulnerability' in research ethics: an in-depth analysis of policies and guidelines. *Health Res Policy Syst.* 2017 Feb 7;15(1):8. doi: 10.1186/s12961-016-0164-6. Erratum in: *Health Res Policy Syst.* 2017 Apr 3;15(1):29. PubMed PMID: 28173859.

- Brovkovich V.M., Kurilo N.B., Barishpol'ts V.L.: Action of millimeter-range electromagnetic radiation on the Ca pump of sarcoplasmic reticulum.[Article in Russian] *Radiobiologia*. 1991 Mar-Apr,31(2):268-71.
- Burachas G., Mascoliunas R. (1989): Suppression of nerve action potential under the effect of millimeter waves. In Devyatkov ND (ed): "Millimeter Waves in Medicine and Biology". Moscow: Radioelectronica, pp 168-175 (in Russian).
- Carlberg M, Hardell L.: Evaluation of Mobile Phone and Cordless Phone Use and Glioma Risk Using the Bradford Hill Viewpoints from 1965 on Association or Causation. *Biomed Res Int*. 2017;2017:9218486. doi: 10.1155/2017/9218486
- Castillo, M.; Quencer, R. M. Sublethal exposure to microwaveradar. *JAMA* 259:355; 1988.
- Chalfin S., J. A. D'Andrea, P. D. Comeau, M. E. Belt, and D. J. Hatcher, B. Millimeter wave absorption in the nonhuman primate eye at 35 GHz and 94 GHz, *Health Phys*, vol. 83, pp. 83–90, 2002.
- Chalfin, S.; D'Andrea, J. A.; Comeau, P. D.; Belt, M. E. Millimeter wave absorption in the nonhuman primate eye. In: *Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society*. Frederick, MD: Bioelectromagnetics Society; 1998: 113.
- Charytoniuk A., *Anteny i propagacja fal radiowych*. Cz. 3, Propagacja fal radiowych, Wojskowa Akademia Techniczna, 1993 r.
- Chernyakov G.M., Korochkin V.L., Babenko A.P., Bigdai E.V. (1989): Reactions of biological systems of various complexity to the action of low-level EHF radiation. In Devyatkov ND (ed): "Millimeter Waves in Medicine and Biology". Moscow: Radioelectronica, pp 141-167 (in Russian).
- Chidichimo G., Beneduci A., Nicoletta M., Critelli M., De Rose R., Tkatchenko Y., Abonante S., Tripepi S., Perrotta E.: 2002. Selective inhibition of tumoral cells growth by low power millimeter waves. *Anticancer Res*. 22, 1681–1688.
- Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021, Cisco, Feb. 7, 2017.
- Cosentino K., Beneduci A., Ramundo-Orlando A., Chidichimo G.: The influence of millimeter waves on the physical properties of large and giant unilamellar vesicles *Journal of Biological Physics*, 2013, 39, 395–410.
- Council Recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). *Official Journal of the European Communities* z 30.07.1999, L 199/59-70.

- Dardalhon M., Averbeck D., Berteaud A.J.: Studies on possible genetic effects of microwaves in procaryotic and eucaryotic cells. *Radiat Environ Biophys.* 1981,20(1):37-51.
- Di Ciaula A. Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int J Hyg Environ Health.* 2018 Apr;221(3):367-375. doi:10.1016/j.ijheh.2018.01.011. Epub 2018 Feb 2. Review.
- Di Donato L., Cataldo M., Stano P., Massa R., Ramundo-Orlando A.: Permeability Changes of Cationic Liposomes Loaded with Carbonic Anhydrase Induced by Millimeter Waves Radiation. *Radiation Research* 178(5):437-446. 2012.
- Durney C.H., Massoudi H., Iskander M.F. *Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook.* 4th Edition, Utah Univ Salt Lake City Dept. Of Electrical Engineering, Utah 1986.
- Dyrektywa 2004/40/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (osiemnasta Dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 Dyrektywy 89/391/EWG), *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej - Wydanie specjalne, PL, roz. 05, t. 005, L159/1, 61-71.*
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta Dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 Dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca Dyrektywę 2004/40/WE. *Dz. U. UE z 29.06.2013 L 179/1-21.*
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej (wersja przekształcona) (DzU UE L.96/79)
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/53/UE z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich dotyczących udostępniania na rynku urządzeń radiowych i uchylająca Dyrektywę 1999/5/WE (DzU UE L 153, 22.5.2014, p. 62–106)
- Ericsson: Future mobile data usage and traffic growth, Ericsson. Mobility report, 2018. Dostępny pod adresem: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/future-mobile-data-usage-and-traffic-growth> (ostatni dostęp: 06.11.2018).

- Falcioni L., Bua L., Tibaldi E., Lauriola M., De Angelis L., Gnudi F., Mandrioli D., Manservigi M., Manservigi F., Manzoli I., Menghetti I., Montella R., Panzacchi S., Sgargi D., Strollo V., Vornoli A., Belpoggi F.: Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ Res.* 2018;165:496-503. doi: 10.1016/j.envres.2018.01.037.
- FCC: 47 CFR chpt. 1, subch. A, Part 15 „Radio Frequency Devices”, §255, „Operation within the band 57-71 GHz”, Federal Communications Commission (FCC).
- FCC: Guidelines for evaluating the environmental effects of radiofrequency radiation, Federal Communications Commission, Washington, DC, Aug. 1996.
- FCC: Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking: FCC 16-89”, Federal Communications Commission (FCC), July 2016.
- Feldman, Y., Puzenko, A., Ben Ishai, P., Caduff, A., Agranat, A.J., 2008. Human skin as arrays of helical antennas in the millimeter and submillimeter wave range. *Phys. Rev.Lett.* 100 (12), 128102. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.128102>.
- Feldman, Y., Puzenko, A., Ben Ishai, P., Caduff, A., Davidovich, I., Sakran, F., Agranat, A.J., 2009. The electromagnetic response of human skin in the millimetre and submillimetre wave range. *Phys. Med. Biol.* 54 (11), 3341–3363. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/54/11/005>. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19430110>).
- Forman, S. A.; Holmes, C. K.; McManamon, T. V.; Wedding, W. R. Psychological symptoms and intermittent hypertension following acute microwave exposure. *J. Occup. Med.* 24:932-934; 1982.
- Foster K i wsp.: Modeling Tissue Heating from Exposure to Radiofrequency Energy and Relevance of Tissue Heating to Exposure Limits: Heating Factor. *Hea Phys* 2018; 115 (2):295-307, doi:10.1097/HP.0000000000000854
- Gandhi OP, Chen JY, Riazi A. Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1986 Aug;33(8):757-67.
- Geletyuk V.I., Kazachenko V.N., Chemeris N.K., Fesenko E.E.: Dual effects of microwaves on single Ca(2+)-activated K<sup>+</sup> channels in cultured kidney cells Vero. *FEBS Lett.* 1995 Feb 6,359(1):85-8.
- Ghosh A. et al., „Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1152–1163, June 2014.

- Grigoriev Y.G., Grigoriev O.A., Ivanov A.A., Lyaginskaya A.M., Merkulov A.V., Shagina N.B., Maltsev V.N., Lévêque P., Ulanova A.M., Osipov V.A., Shafirkin A.V.: Confirmation studies of Soviet research on immunological effects of microwaves: Russian immunology results. *Bioelectromagnetics*. 201031(8):589-602. doi:10.1002/bem.20605
- Gross, M.L., 2010. Medicalized weapons & modern war. *Hastings Cent. Rep.* 40 (1), 34–43. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=20166514>,
- GSA: Spectrum used for LTE – July 2017 update”, GSA – Global mobile Suppliers Association. Dostępny pod adresem: <https://gsacom.com/paper/spectrum-used-lte/> (ostatni dostęp: 09.11.2018).
- Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Phys.* vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998
- Habauzit D., Le Quément C, Zhadobov M., Martin C., Aubry M., Sauleau R., Le Dréan Y.: Transcriptome Analysis Reveals the Contribution of Thermal and the Specific Effects in Cellular Response to Millimeter Wave Exposure. *PLoS One* 9 e109435.
- Haynie DT, *Biological Thermodynamics*. Cambridge University Press 2008.
- Hinrikus H., Bachmann M., Lass J. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect, *International Journal of Radiation Biology* 2018, 94(10): 877-882, <http://dx.doi.org/10.1080/09553002.2018.1478158>.
- IARC Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. The WHO/IARC, IARC Monographs Volume 102. Lyon, France, 2013.
- ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz, *Health Physics*, vol. 106, No. 3, 5418-425, 2014.
- ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Physics*, vol. 99, No. 6 (December), 818-836, 2010.
- ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Heal. Phys.* 1998, 74 (4):494-522.
- ICNIRP Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics*, 2009, 96, 504-514.
- ICNIRP Standing Committee on Epidemiology, Ahlbom A., Cardis E., Green A., Linet M., Savitz D. i wsp.: Review of the epidemiological literature on EMF and health. *Environ. Health Perspect.* 2001; 109 (Suppl.6): 911–933.

- ICNIRP Standing Committee on Epidemiology, Ahlbom A., Green A., Khaifets L., Savitz D. I Swerdlow A.: Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environmental Medicine*. 2004; 112 (17): 1741-1754.
- IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to the Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std. C95.1, 2005.
- ITU: ITU-R P.676-11 (09/2016), „Attenuation by atmospheric gases”.
- ITU: ITU-R P.838-3, „Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”, 2005.
- ITU: ITU-R PN.837-1, „Characteristics of precipitation for propagation modeling”, 1994.
- ITU-R M.2083 (09/2015), IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, November 2014.
- ITU-R M.2320 - Future technology trends of terrestrial IMT systems (November 2014).
- ITU-R M.2376 - Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz (July 2015).
- Jauchem JR, Ryan KL, Frei MR. Cardiovascular and thermal effects of microwave irradiation at 1 and/or 10 GHz in anesthetized rats. *Bioelectromagnetics*. 2000 Apr;21(3):159-66.
- Jauchem JR, Ryan KL, Frei MR. Cardiovascular and thermal responses in rats during 94 GHz irradiation. *Bioelectromagnetics*. 1999;20(4):264-7.
- Jauchem JR, Ryan KL, Walters TJ. Pathophysiological alterations induced by sustained 35-GHz radio-frequency energy heating. *J Basic Clin Physiol Pharmacol*. 2016 Jan;27(1):79-89. doi: 10.1515/jbcpp-2015-0011.
- Karpowicz J. i wsp., Pola i promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 0 Hz - 300 GHz. Dokumentacja nowelizacji harmonizującej dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z wymaganiami Dyrektywy 2004/40/WE. *Podstawy i Metody Oceny Środowisko Pracy*, 2008, nr 4(58), s. 7-45.
- Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P. Zasady stosowania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami Dyrektywy europejskiej 2004/40/WE odnośnie bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych, *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 2008, 4(58), 103-136.
- Kelley E., Blank M., Lai H., Moskowitz J., Havas M. International Appeal: Scientists call for protection from non-ionizing electromagnetic field exposure. *Eur J Onc* 2015;20:180-182.
- Khramov R.N., Sosunov E.A., Koltun S.V., Ilyasova E.N., Lednev V.V. Millimeter-wave effects on electric activity of crayfish. *Bioelectromagnetics* 1991;12:203-214.

- Kojima M., Hanazawa M., Yamashiro Y., Sasaki H., Watanabe S., Taki M., Suzuki Y., Hirata A., Kamimura Y., Sasaki K.: Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure. *Health Phys.* 2009, 97(3):212-8.
- Kojima M., Suzuki Y., Sasaki K., Taki M., Wake K., Watanabe S., Mizuno M., Tasaki T., Sasaki K. Ocular Effects of Exposure to 40, 75, and 95 GHz Millimeter Waves. *J Infrared Milli Terahz Waves.* 2018, 39 (9): 912–925.
- Kolosova LI, Akoev GN, Avelev VD, Riabchikova OV, Babu KS. Effect of low-intensity millimeter wave electromagnetic radiation on regeneration of the sciatic nerve in rats. *Bioelectromagnetics.* 1996;17(1):44-7.
- Korniewicz H. i wsp.: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 2001, nr 2(28).
- Koyama S., Narita E., Shimizu Y., Suzuki Y., Shiina T., Taki M., Shinohara N., Miyakoshi J.: Effects of Long-Term Exposure to 60 GHz Millimeter-Wavelength Radiation on the Genotoxicity and Heat Shock Protein (Hsp) Expression of Cells Derived from Human Eye. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13(8), 802.
- Kubacki R., *Anteny mikrofalowe: technika i środowisko*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2009 r.
- Kues H.A., D'Anna S.A., Osiander R., Green W.R., Monahan J.C.: Absence of ocular effects after either single or repeated exposure to 10 mW/cm<sup>2</sup> from a 60 GHz CW source. *Bioelectromagnetics.* 1999 Dec, 20(8):463-73.
- Kuźmenko V.M.: The role of microwave resonance therapy in the combined treatment of patients with cerebral atherosclerosis. *Lik Sprava.* 1998, 7:146–8.
- Lawrence, J. C.; Bull, J. P. Thermal conditions which cause skin burns. *J. Inst. Mech. Eng.* 56-63; 1976.
- Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, Jokela K, Hirata A.: Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2017, 62: 6980–6992, <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa81fe>
- Le Dréan Y., Mahamoud Y.S., Le Page Y., Habauzit D., Le Quément C., Zhadobov M., Sauleau R.: State of knowledge on biological effects at 40–60 GHz. *Comptes Rendus Physique.* May, 2013 14(5):402–411.

- Le Quément C., Nicolaz Ch. N., Habauzit D., Zhadobov M., Sauleau R., Le Dréan Y.: Impact of 60 GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression. *Bioelectromagnetics*. 35:444–451, 2014.
- Le Quément C., Nicolaz Ch. N., Zhadobov M., Desmots F., Sauleau R., Aubry M., Michel D., Le Dréan Y.: Whole genome expression analysis in primary human keratinocyte cell cultures exposed to 60GHz radiation. *applications. Bioelectromagnetics* 33:147–158, 2012.
- Leondes C.T. (red.), *Computational Methods in Biophysics, Biomaterials, Biotechnology and Medical Systems: Algorithm Development, Mathematical Analysis and Diagnostics*, Springer US, 2002
- Levine RD. *Molecular Reaction Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005
- LeVine, S., 2009. *The Active Denial System: A Revolutionary, Non-lethal Weapon for Today's Battlefield*. Center for Technology and National Security Policy National Defense University. National Defense University Press. <http://ndupress.ndu.edu/Media/News/Article/1229000/dtp-065-the-active-denial-system-a-revolutionarynon-lethal-weapon-for-todays-b/>.
- Li X., Du M., Liu X., Chen W., Wu M., Lin J., Wu G.: Millimeter wave treatment promotes chondrocyte proliferation by upregulating the expression of cyclin-dependent kinase 2 and cyclin A. *International Journal of Molecular Medicine* 26: 77-84, 2010 77.
- Li X., Liu Ch., Liang W., Ye H., Chen W., Lin R., Li Z., Liu X., Wu M.: Millimeter wave promotes the synthesis of extracellular matrix and the proliferation of chondrocyte by regulating the voltage-gated K<sup>+</sup> Chanel. *J Bone Miner Metab* (2014) 32:367–377.
- Lin JC, Wang ZW. Hearing of microwave pulses by humans and animals: effects, mechanism, and thresholds. *Health Phys* 92(6):621-628; 2007.
- Logani M.K., Bhanushali A., Ziskin M.C., Prihoda T.J.: Micronuclei in peripheral blood and bone marrow cells of mice exposed to 42 GHz electromagnetic millimeter waves. *Radiat. Res.* 2004, 161(3):341–345.
- Lushnikov K.V., Shumilina Y.V., Yakushina V.S., Gapeev A.B., Sadovnikov V.B., Chemeris N.K.: Effects of low-intensity ultrahigh frequency electromagnetic radiation on inflammatory processes. *Bull. Exp. Biol. Med.*, 137 (2004), 364–366.
- Lysenyuk, V.P., Samosyuk I.Z., Kulikovich Y.N., Kozhanova A.K.: Experimental study on the low-intensity millimeter-wave electromagnetic stimulation of acupuncture points. *Acupunct. Electrother. Res.*, 25 (2000), 91–99.



- Magin R.L., Liburdy R.P., Persson B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.* 1992, 649
- Mahamoud Y.S., Aite M., Martin C., Zhadobov M., Sauleau R., Le Dréan Y., Habauzi D.: Additive Effects of Millimeter Waves and 2-Deoxyglucose Co-Exposure on the Human Keratinocyte Transcriptome. *PLoS One* 11 e0160810 (2016)
- Makar V., Logani M., Szabo I., Ziskin M.: Effect of millimeter waves on cyclophosphamide induced suppression of T cell functions. *Bioelectromagnetics*, 24 (2003), 356–365.
- Makar V.R., Logani M.K., Bhanushali A., Alekseev S.I., Ziskin M.C.: Effect of cyclophosphamide and 61.22 GHz millimeter waves on T-cell, B-cell, and macrophage functions. *Bioelectromagnetics*, 27 (2006), 458–466.
- Makar V.R., Logani M.K., Bhanushali A., Kataoka M., Ziskin M.C.: Effect of millimeter waves on natural killer cell activation. *Bioelectromagnetics*. 2005 Jan, 26(1):10-9.
- Millenbaugh N. J., Roth C., Sypniewska R., Chan V., Eggers J. S., Kiel J. L., Blystone R. V., Mason P. A.: Gene Expression Changes in the Skin of Rats Induced by Prolonged 35 GHz Millimeter-Wave Exposure. *Radiat. Res.* 169, 288–300 (2008).
- Millenbaugh NJ, Kiel JL, Ryan KL, Blystone RV, Kalns JE, Brott BJ, Cerna CZ, Lawrence WS, Soza LL, Mason PA. Comparison of blood pressure and thermal responses in rats exposed to millimeter wave energy or environmental heat. *Shock*. 2006 Jun; 25(6):625-32.
- Miller A.B., Morgan L.L., Udasin I., Davis D.L.: Cancer epidemiology update, following the 2011 IARC evaluation of radiofrequency electromagnetic fields (Monograph 102). *Environ Res.* 2018; 167:673-683. doi:10.1016/j.envres.2018.06.043.
- Ministerstwo Cyfryzacji: Strategia 5G dla Polski, Warszawa 2018, [https://www.gov.pl/documents/31305/436699/Strategia+5G+dla+Polski.pdf/0cd08029-2074-be13-21c8-fc1cf09629b0 z 05.01.2018]
- Momoli F, Siemiatycki J, McBride ML, Parent M, Richardson L, Bedard D, Platt R, Vrijheid M, Cardis E, Krewski D. Probabilistic Multiple-Bias Modeling Applied to the Canadian Data From the Interphone Study of Mobile Phone Use and Risk of Glioma, Meningioma, Acoustic Neuroma, and Parotid Gland Tumors. *Am J Epidemiol.* 2017 Oct 1; 186(7):885-893. doi: 10.1093/aje/kwx157.
- Moritz, A. R.; Henriques, F. C., Jr. Studies of thermal injury. 11. The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. *Am. J. Path.* 23:695-720, 194.
- Moskalik K: Ocena poziomu pól elektromagnetycznych w środowisku za lata 2014-2016 – w oparciu o wyniki pomiarów Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska. Warszawa, 2017.

[http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring\\_pol\\_elektromagnetycznych/Ocena\\_poziomu\\_pol\\_elektromagnetycznych\\_za\\_lata\\_2014-2016.pdf](http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_pol_elektromagnetycznych/Ocena_poziomu_pol_elektromagnetycznych_za_lata_2014-2016.pdf).

- Neufeld E, Kuster N: Systematic Derivation of Safety Limits for Time-Varying 5G Radiofrequency Exposure Based on Analytical Models and Thermal Dose - Health Physics 2018. 115(6): 705–711, doi: 10.1097/HP.0000000000000930
- Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, Dz. U. 2018, poz. 1612
- Okumura Y., „5G mobile radio access system using SHF/EHF bands”, Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2014, Sendai, Japan, Nov. 4-7, 2014, pp. 908-910.
- Osepchuk J.M., Petersen R.C.: Historical Review of RF Exposure Standards and the International Committee on Electromagnetic Safety (ICES), Bioelectromagnetics Supplement 2003;6:7-16.
- Pakhomov A.G., Akyel Y., Pakhomova O.N., Stuck B.E., Murphy M.R.: Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: a review of the literature. Bioelectromagnetics. 1998,19(7):393-413.
- Pakhomov A.G., Prol H.K., Mathur S.P., Akyel Y., Campbell C.B.G.: Search for frequency specific effects of millimeter wave radiation on isolated nerve function. Bioelectromagnetics 1997;18:324–334.
- Park CJ, Seo YS. Heat Shock Proteins: A Review of the Molecular Chaperones for Plant Immunity. Plant Pathol J. 2015;31(4):323-33.
- Partyla T, Hacker H, Edinger H, Leutzow B, Lange J, Usichenko T. Remote Effects of Electromagnetic Millimeter Waves on Experimentally Induced Cold Pain: A Double-Blinded Crossover Investigation in Healthy Volunteers. Anesth Analg. 2017 Mar;124(3):980-985. doi: 10.1213/ANE.0000000000001657.
- Pikov V., Arakaki X., Harrington M., Fraser S.E., Siegel P.H.: Modulation of neuronal activity and plasma membrane properties with low-power millimeter waves in organotypic cortical slices. J Neural Eng. 2010 Aug,7(4):045003.
- PN-EN 50527-1:2017. „Procedura oceny ekspozycji pracowników z wszczepionymi aktywnymi implantami medycznymi w polach elektromagnetycznych – Część 1: Informacje ogólne”.
- PN-EN 60601-1-2:2015 Medyczne urządzenia elektryczne - Część 1-2: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego - Norma uzupełniająca: Zakłócenia elektromagnetyczne - Wymagania i badania.

- Poljak D. i Brebbia C.A. *Boundary Element Methods for Electrical Engineers*, WIT Press, Boston 2005
- Polk C. Introduction w: Barnes F.S. i Greenebaum B (red.) *Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*, wyd. 3, CRC Press, Boca Raton 2006.
- Potekhina I.L., Akoyev G.N., Yenin L.D., Oleyner V.D. (1992): Effects of low-intensity electromagnetic radiation in the millimeter range on the cardio-vascular system of the white rat. *Fiziol Zh [formerly Fiziol Zh SSSR]* 78: 35-41 (in Russian).
- Prasad M, Kathuria P, Nair P, Kumar A, Prasad K.: Mobile phone use and risk of brain tumours: a systematic review of association between study quality, source of funding, and research outcomes. *Neurol Sci.* 2017;38(5):797-810. doi:10.1007/s10072-017-2850-8.
- Prost M., Olchowik G., Hautz W., Gawęda R.: Badania doświadczalne nad wpływem promieniowania milimetrowego na transmisję światła przez soczewkę. *Klin Oczna.* 1994 Aug-Sep;96(8-9):257-9.
- Radzievsky A.A., Gordiienko O.V., Alekseev S., Szabo I., Cowan A., Ziskin M.C.: Electromagnetic millimeter wave induced hypoalgesia: frequency dependence and involvement of endogenous opioids. *Bioelectromagnetics*, 29 (2008), 284–295.
- Radzievsky A.A., Gordiienko O.V., Szabo I., Alekseev S.I., Ziskin M.C.: Millimeter wave-induced suppression of B16 F10 melanoma growth in mice: involvement of endogenous opioids. *Bioelectromagnetics*. 2004 Sep;25(6):466-73.
- Radzievsky A.A., Rojavin M.A., Cowan A., Alekseev S.I., Ziskin M.C.: Hypoalgesic effect of millimeter waves in mice: dependence on the site of exposure. *Life Sci.*, 66 (2000), 2101–2011.
- Radzievsky, A.A.; Rojavin, M.A.; Cowan, A.; Alekseev, S.I.; Radzievsky, A.A. Jr.; Ziskin, M.C.: Peripheral neural system involvement in hypoalgesic effect of electromagnetic millimeter waves. *Life Sci.*, 68 (2001), 1143–1151.
- Ramundo-Orlando A., Gallerano G.P., Stano P., Doria A., Giovenale E., Messina G., Cappelli M., D'Arienzo M., Spassovsky I.: Permeability changes induced by 130 GHz pulsed radiation on cationic liposomes loaded with carbonic anhydrase. *Bioelectromagnetics*. 2007, 28(8):587–598.
- Ramundo-Orlando A., Longo G., Cappelli M., Girasole M., Tarricone L., Beneduci A., Massa R.: The response of giant phospholipid vesicles to millimeter waves radiation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*. Jul, 2009 1788(7):1497–1507.

- Rangan S., Rappaport T.S., and Erkip E., "Millimeter-wave cellular Wireless networks: Potentials and challenges", *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, Mar. 2014.
- RAPORT: Pomiar pól elektromagnetycznych (PEM) wytwarzanych przez stacje bazowe telefonii komórkowej. Etap II – pomiary na terenie całego kraju. Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa grudzień 2017 r.  
<https://www.gov.pl/documents/31305/436699/RAPORT+-+Pomiary+p%C3%B3l+elektromagnetycznych+%28PEM%29+wytwarzanych+przez+stacje+bazowe+telefonii+kom%C3%B3rkowej.pdf/d73f308e-9f43-6edd-141f-153b73a64bd5>
- Rappaport T.S. et al., "MillimeterWave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, May 2013.
- Rappaport T.S., „Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Special Issue on 5G, Nov. 2017.
- Rezolucja 1815 Rady Europy: The potential dangers of electromagnetic fields and their effect on the environment, 2011 <http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/X2H-Xref-ViewPDF.asp?FileID=17994&lang=en>
- Roh W. et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results" *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, Feb. 2014.
- Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 12 grudnia 2014 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego. (Dz.U. z 2014 r. poz. 1843).
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29.06.2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne, tj.: DzU 2018, poz. 331
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 3 lipca 2018 (Dz. U. z 2018 r. poz. 1286) w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12.11.2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Dz.U.Nr 221, poz. 1645.

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. Nr 192, poz. 1883, 2003).
- Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości [Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, Dz. U. 2018, poz. 1612.
- Russell CL. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environ Res.* 2018 Aug;165:484-495. doi:10.1016/j.envres.2018.01.016.
- Ryan KL, D'Andrea JA, Jauchem JR, Mason PA. Radio frequency radiation of millimeter wave length: potential occupational safety issues relating to surface heating. *Health Phys.* 2000 Feb;78(2):170-81.
- Sage, C., Carpenter D.O., 2012. BioInitiative Working Group, BioInitiative Report: A Rationale for a Biologically-based Public Exposure Standard for Electromagnetic Radiation at ([www.bioinitiative.org](http://www.bioinitiative.org)) (31 December 2012)
- Sazonov A.Yu., Zamuraev I.N., Lukashin V.G.: Effect of the extremely high frequency electromagnetic radiation on bush-like receptors of frog bladder. *Fiziol Zh Im I M Sechenova* 1995, 81:46-49 (in Russian).
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) 2015. "Potential health effects of exposure to electromagnetic fields(EMF)", SCENIHR adopted this Opinion at the 9th plenary meeting on 27 January 2015.
- Shapiro M.G., Priest M.F., Siegel P.H., Bezanilla F.: Thermal mechanisms of millimeter wave stimulation of excitable cells. *Biophys J.* 2013,104(12):2622-8.
- Shellock, F. G.; Crues, J. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology* 1987, 163:259–262.
- Sheppard A.R., Swicord M.L., Balzano Q. Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes. *Health Phys.* 2008;95(4): 365-96. doi: 10.1097/01.HP.0000319903.20660.37.
- Sypniewska R., Millenbaugh N.J., Kiel J.L., Blystone R.V., Ringham H.N., Mason P.A., Witzmann F.A.: Protein changes in macrophages induced by plasma from rats exposed to 35 GHz millimeter waves. *Bioelectromagnetics* 31:656–663, 2010.

- Szabo I., Kappelmayer J., Alekseev S.I., Ziskin M.C.: Millimeter wave induced reversible externalization of phosphatidylserine molecules in cells exposed in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2006 Apr;27(3):233-44.
- Szabo I., Rojavin M.A., Rogers T.J., Ziskin M.C.: Reactions of keratinocytes to in vitro millimeter wave exposure. *Bioelectromagnetics*, 22 (2001), 358–364.
- Szóstka J., Fale i anteny, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2006 r.
- Urząd Komunikacji Elektronicznej: Częstotliwości dla 5G. Konsultacje założeń zagospodarowania widma radiowego, Warszawa 2018, [https://bip.uke.gov.pl/download/gfx/bip/pl/defaultaktualnosci/33/333/1/czestoliwosci\_dla\_5g\_2018.07.05\_-\_odczyt.ppsx z05.07.2018]
- Usichenko T.I., Ivashkivsky O.I., Gizhko V.V.: Treatment of rheumatoid arthritis with electromagnetic millimeter waves applied to acupuncture points – a randomized double blind clinical study. *Acupunct. Electrother. Res.*, 28 (2003), 11–18.
- Usichenko T.I., Edinger H., Gizhko V.V., Lehmann C., Wendt M., Feyerherd F.: Low-intensity electromagnetic millimeter waves for pain therapy. *Evid. Based Complement. Altern. Med.*, 3 (2006), 201–207.
- Vorobyov V.V., Khramov R.N.: Hypothalamic effects of millimeter wave irradiation depend on location of exposed acupuncture zones in unanesthetized rabbits. *Am. J. Chin. Med.*, 30 (2002), 29–35.
- Williams RA, Webb TS. Exposure to radio-frequency radiation from an aircraft radar unit. *Aviat Space Environ Med*. 1980 Nov;51(11):1243-4.
- Wu T, Rappaport TS, Collins CM. Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for Millimeter Waves in Wireless Communications. *IEEE Microw Mag*. 2015b;16(2):65-84.
- Wu T, Rappaport TS, Collins CM: The Human Body and Millimeter-Wave Wireless Communication Systems: Interactions and Implications, *IEEE ICC 2015a - Wireless Communications Symposium*, pp. 2423-2429.
- Wyde M, Cesta M, Blystone C, Elmore S, Foster P, Hooth M, Kissling G, Malarkey D, Sills R, Stout M, Walker N, Witt K, Wolfe M, Bucher J. Report of partial findings from the National Toxicology Program carcinogenesis studies of cell phone radiofrequency radiation in Hsd: Sprague Dawley SD rats (whole body exposure). *BioRxiv 055699 [Preprint] May 26, 2016 (modified Feb 01, 2018)*. <https://doi.org/10.1101/055699>

- Xie T, Pei J, Cui Y, Zhang J, Qi H, Chen S, Qiao D. EEG changes as heat stress reactions in rats irradiated by high intensity 35 GHz millimeter waves. *Health Phys.* 2011 Jun;100(6):632-40. doi: 10.1097/HP.0b013e3182027d10.
- Yaekashiwa N., Otsuki S., Hayashi S., Kawase K.: Investigation of the non-thermal effects of exposing cells to 70–300 GHz irradiation using a widely tunable source. *Journal of Radiation Research*, Volume 59, Issue 2, 1 January 1753, Pages 116-121. <https://academic.oup.com/jrr/article/59/2/116/4769636>.
- Yang M., Guo W., Yang C., Tang J., Huang Q., Feng S., Jiang A., Xu X., Jiang G.: Mobile phone use and glioma risk: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One.* 2017,12(5):e0175136. doi: 10.1371/journal.pone.0175136.
- Yiming Huo et al., „5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design”, *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 13992-14010.
- Zhadobov M., Sauleau R., Vie V., Himdi M., Le Coq L., Thouroude D.: Interactions between 60-GHz millimeter waves and artificial biological membranes: Dependence on radiation parameters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2006, 54(6):2534–2542.
- Zhadobov M., Sauleau R., Le Coq L., Debure L., Thouroude D., Michel D., Le Dréan Y.: Low-power millimeter wave radiations do not alter stress-sensitive gene expression of chaperone proteins. *Bioelectromagnetics.* 2007 Apr,28(3):188-96.
- Ziskin, M.C., 2013. Millimeter waves: acoustic and electromagnetic. *Bioelectromagnetics* 34 (1), 3–14. <http://dx.doi.org/10.1002/bem.21750>.
- Zradziński P, 2015, The examination of virtual phantoms with respect to their involvement in a compliance assessment against the limitations of electromagnetic hazards provided by European Directive 2013/35/EU.. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 28(5), 781–792, 2015.
- Zradziński P, Difficulties in applying numerical simulations to an evaluation of occupational hazards caused by electromagnetic fields. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 21(2), 213-220, 2015.
- Zradziński P, The properties of human body phantoms used in calculations of electromagnetic fields exposure by wireless communication handsets and hand operated industrial devices. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 32(2), 226-235, 2013.
- Zradziński P. i wsp., Bezpieczeństwo użytkowników aktywnych implantów medycznych przebywających w polach elektromagnetycznych infrastruktury elektroenergetycznej W: *Ochrona przed promieniowaniem jonizującym i niejonizującym. Nowe uregulowania prawne*,

źródła, problemy pomiarowe Red. M. Zmyślony, E. M. Nowosielska Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2015, s. 265-277.

Zradziński P. i wsp., Ocena narażenia na pola elektromagnetyczne użytkowników przenośnych radiotelefonów, z wykorzystaniem symulacji numerycznych i wymagań Dyrektywy 2013/35/UE, *Medycyna Pracy* 64(6), 2013, 817-827.

Zradziński P. Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne, *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2016, nr 4(90), s. 75-89.