

Wpływ użytkowania telefonów komórkowych na narząd słuchu

lek. Artur Kacprzyk

Wstęp

Rozpowszechnienie telefonii komórkowej

W ciągu ostatnich kilkunastu lat telefonia komórkowa, zarówno na świecie, jak i w Polsce, stała się jednym z podstawowych atrybutów życia codziennego. Z urządzenia służącego wyłącznie do komunikacji telefony komórkowe stały się narzędziem pracy i rozrywki, bez którego codzienne funkcjonowanie okazuje się często coraz trudniejsze. Według raportu „Digital 2021” aktualnie na świecie 5,22 miliarda osób korzysta z telefonów komórkowych, co stanowi 2/3 globalnej populacji i więcej niż 85% populacji osób powyżej 13 roku życia [1]. Tak jak w latach poprzednich, w ciągu ostatniego roku także zaobserwowano wzrost liczby użytkowników o około 2 punkty procentowe w porównaniu do roku poprzedniego. Użytkownik spędza średnio przed ekranem telefonu komórkowego 4 godziny i 10 minut dziennie, z czego 44% czasu poświęca na media i komunikatory społecznościowe, 26% – na filmy i inne aplikacje rozrywkowe, 9% – na gry mobilne, a 21% – na inne aktywności. W porównaniu do roku poprzedniego w 2020 roku użytkownicy spędzali o 20% więcej czasu, używając aktywnie telefonu komórkowego. Dane z roku 2019 wskazują, że w Polsce zarejestrowanych było 48,4 mln numerów sieci komórkowej, z których korzystało ponad 92% Polaków, a łączna długość połączeń wychodzących sięgnęła 200 tysięcy lat rocznie [2]. Liczby te wskazują, że rozpowszechnienie telefonów komórkowych w Polsce i na świecie jest ogromne oraz wiąże się z istotną ekspozycją na promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości radiowych (RF-EMF).

Jak działa sieć komórkowa?

W uproszczeniu komunikacja w obrębie sieci komórkowej opiera się o szereg anten (stacji bazowych), które przekazują informacje, do lub od urządzeń mobilnych znajdujących się na obsługiwanym obszarze, z wykorzystaniem fal radiowych. Poszczególne urządzenia nie kontaktują się bezpośrednio ze sobą, lecz łączą się właśnie za pośrednictwem stacji bazowych, widocznych w codziennym krajobrazie pod postacią masztów lub wsporników z zainstalowanymi antenami, umieszczonych np. na dachach budynków. Obecnie możemy wyróżnić cztery generacje funkcjonujących sieci telefonii komórkowej: 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) oraz 5G (NR). Rosnące wymagania, zmieniający się i coraz szerszy

zakres usług oraz przyszłe wyzwania stojące przed operatorami sieci komórkowej wpływają na ciągły rozwój standardów telekomunikacji [3].

Ekspozycja na pole elektromagnetyczne z zakresów radiowych wynikająca z użytkowania telefonów komórkowych może być podzielona na tę wynikającą z sygnału przesyłanego przez stację bazową do telefonu komórkowego (tzw. *downlink*) oraz tę pochodzącą z urządzenia mobilnego, sygnału przesyłanego do stacji bazowej (tzw. *uplink*). W przypadku analizy wpływu telefonów komórkowych na zdrowie bada się przede wszystkim charakterystykę sygnału pochodzącego z telefonu komórkowego (*uplink*), która zależy od używanego standardu komunikacyjnego, dostępności stacji bazowych telefonii komórkowej w pobliżu (w sensie odległości pomiędzy stacjami bazowymi a telefonem komórkowym), a także rodzaju urządzenia mobilnego [4].

Promieniowanie jonizujące a niejonizujące

Telekomunikacja z zastosowaniem telefonów komórkowych odbywa się za pośrednictwem fal radiowych o częstotliwości od ok. 800 MHz do ok. 2,6 GHz, a w związku z rozwojem i implementacją standardu 5G obecnie przewiduje się wykorzystanie także tzw. pionierskich pasm częstotliwości, tj. 700 MHz, 3,6 GHz i 26 GHz. Są to fale ze spektrum promieniowania niejonizującego, czyli takiego, którego energia kwantów nie wystarcza do wywołania jonizacji, a więc oddziaływanie tego typu promieniowania z materią nie ma charakteru chemicznego. Innymi słowy energia pochodząca z fal radiowych nie ma wystarczającej energii, aby powodować powstawanie bądź niszczenie wiązań chemicznych pomiędzy atomami. Oddziaływanie fal radiowych z materią ma jedynie charakter termiczny (cieplny), czyli może powodować zmianę temperatury materii, na którą oddziałuje. Natomiast w przypadku promieniowania jonizującego, czyli np. promieniowania rentgenowskiego bądź ultrafioletowego, kwanty promieniowania (fotony) są obdarzone energią na tyle dużą, że są w stanie zmieniać wiązania pomiędzy atomami, a przez to powodować mutacje w obrębie materiału genetycznego. O ile nie ma wątpliwości co do szkodliwości promieniowania jonizującego, badania nad promieniowaniem niejonizującym prowadzone są na bardzo szeroką skalę. Pomimo licznych badań dowody na potencjalną szkodliwość promieniowania niejonizującego są kontrowersyjne.

W dostępnej literaturze odnaleźć możemy dane dotyczące oddziaływań termicznych telefonów komórkowych i ich wpływu na organizm. Wskazuje się m.in. na podwyższoną częstość objawów, takich jak bóle głowy, odczucie pieczenia i zaczerwienienia w obrębie skóry małżowiny usznej i twarzy czy upośledzenie bariery krew-mózg. Postulowane efekty tzw. nietermicznych oddziaływań pola elektromagnetycznego w radiowym zakresie częstotliwości to upośledzenie snu, wzrost ciśnienia tętniczego czy zaburzenia poznawcze. Prowadzone były także liczne badania w zakresie występowania nowotworów. Dowody na potencjalną szkodliwość są jednak bardzo ograniczone i niespójne, a wyni-

ki prowadzonych badań – często trudne do interpretacji ze względu na czynniki zakłócające i ograniczenia metodologii.

Efekty termiczne

Efekty termiczne są jedynym udowodnionym i realnym mechanizmem oddziaływania fal radiowych pochodzących z telefonów komórkowych na organizm człowieka. Pole elektromagnetyczne, oddziałując z tkankami człowieka podczas ich penetracji, ulega tłumieniu i stopniowo wytraca swoją energię, przekazując ją do ośrodka, co skutkuje wzrostem energii wewnętrznej materiału, czyli podwyższeniem temperatury. Absorpcja energii w przypadku rozmowy przez telefon komórkowy ma głównie miejsce w powierzchniowych warstwach skóry, co może powodować lokalny wzrost temperatury [5]. Postuluje się, że taki lokalny wzrost temperatury może mieć wpływ na fizjologię okolicy objętej oddziaływaniem, a w przypadku długotrwałej ekspozycji – prowadzić do uchwytnych patologii. Należy brać jednak pod uwagę mechanizmy kompensacyjne ustroju, polegające na zdolności do usuwania nadmiaru energii i utrzymania homeostazy termicznej. Mechanizmy te obejmują usuwanie nadmiaru ciepła przy pomocy konwekcji, lokalnego wzrostu przepływu krwi czy wydzielania potu.

Miarą tempa pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego zamienianego w tkankach organizmu na ciepło jest współczynnik tzw. szybkości absorpcji swoistej (ang. Specific Absorption Rate, SAR), który wyznaczany jest dla każdego typu telefonu komórkowego przed wprowadzeniem go na rynek. Wyrażany jest on w jednostce [W/kg], innymi słowy opisuje on energię pochłanianą przez jednostkę masy ciała w jednostce czasu. Celem ograniczenia nadmiernego nagrzewania tkanek wartość SAR ograniczona jest specyficznymi regulacjami i opisana odpowiednimi normami. Wartość SAR wyznaczana jest najczęściej w warunkach laboratoryjnych przez producenta sprzętu z wykorzystaniem odpowiednich fantomów, których właściwości elektryczne odpowiadają właściwościom ciała ludzkiego. Wtedy określa się zwykle maksymalne wartości SAR, które mogą być uzyskane w czasie użytkowania telefonu komórkowego. Jak jednak pokazują badania, SAR osiągnany w warunkach rzeczywistego użytkowania telefonu zależy od licznych czynników, np. kształtu głowy użytkownika, własności fizycznych tkanek, relacji pomiędzy pozycją telefonu i głowy w czasie użytkowania, miejsca, w którym urządzenie jest podtrzymywane przez dłoń, liczby aplikacji aktywnych w systemie operacyjnym telefonu i w szczególności – mocy emitowanej przez urządzenie w danym momencie.

Efekty nietermiczne w radiowym zakresie częstotliwości

Jak opisano wcześniej, promieniowanie elektromagnetyczne w radiowym zakresie częstotliwości jest promieniowaniem niejonizującym, stąd głównym postulowanym mechanizmem jego potencjalnego wpływu na organizm są jego efekty termiczne. Część autorów sugeruje jednak występowanie efektów nietermicznych tego oddziaływania, co od wielu lat stanowi kontrowersyjny temat w środowisku badaczy. W analizie tych efektów w pierwszej kolejności zwracano uwagę na wpływ na układ nerwo-

wy, który uważano za najbardziej czuły na możliwe efekty tego oddziaływania. W późniejszych latach pojawiały się kolejne publikacje sugerujące efekty genotoksyczne, upośledzenie kanałów jonowych i funkcji neurotransmiterów, uszkodzenie bariery krew-mózg czy nawet pogorszenie funkcji poznawczych na skutek działania efektów nietermicznych. Wyniki tych badań w większości przypadków są jednakże obserwacjami pojedynczymi i stojącymi w sprzeczności z innymi dostępnymi danymi, stąd nie pozwalają na wyciąganie jednoznacznych wniosków.

Metodyka badań nad wpływem użytkowania telefonów komórkowych na zdrowie

Aktualnie prowadzi się bardzo liczne badania mające na celu ocenę wpływu pola elektromagnetycznego pochodzącego z różnorodnych źródeł na występowanie potencjalnych negatywnych efektów zdrowotnych. Analizowane są różnorodne zjawiska chorobowe, począwszy od chorób nowotworowych, po występowanie niespecyficznych objawów jak zmęczenie czy senność.

Badania tego typu prowadzić można na wiele sposobów. Najlepiej kontrolowane i stałe warunki osiągnąć można w laboratorium badawczym, wykorzystując np. generator RF połączony z anteną, umożliwiającą wytworzenie pola elektromagnetycznego o określonych i kontrolowanych w czasie parametrach (natężenie oraz częstotliwość). Efekty analizować można wówczas, zależnie od celu badania, poprzez ekspozycję pojedynczych komórek lub tkanek, zwierząt laboratoryjnych lub ochotników (w obrębie natężeń pola spełniających normy zdrowotne, bez ryzyka narażenia ochotników na negatywne konsekwencje). W przypadku badań w warunkach laboratoryjnych możemy precyzyjnie określić zasady badania i pożądaną ekspozycję oraz zminimalizować udział czynników zakłócających. Przykładem takich badań w tematyce wpływu promieniowania na narząd słuchu mogą być np. analizy polegające na ekspozycji komórek receptorowych ucha wewnętrznego na promieniowanie odpowiadające temu, które emitowane jest przez telefony komórkowe. Innym przykładem mogą być eksperymenty, w których ochotnicy odbywają symulowaną rozmowę telefoniczną w warunkach laboratoryjnych, co pozwala badaczom na analizę porównawczą parametrów słuchowych przed i po ekspozycji.

Innym sposobem analizy wpływu pola elektromagnetycznego na zdrowie są badania oparte o ocenę codziennej ekspozycji, gdzie w populacji badanej określamy występowanie danych zjawisk zdrowotnych i porównujemy ich częstości zależnie od ekspozycji. Są to badania obserwacyjne, ekspozycja na dany czynnik nie zależy od badaczy, lecz od uczestników badania lub zbiegu okoliczności. Rolą badaczy w tym typie badań jest analiza ekspozycji i występowania punktów końcowych.

Badania te dzielimy na kohortowe, kliniczno-kontrolne, przekrojowe i opisy przypadków.

W badaniach kohortowych badacze wybierają grupę ludzi, wśród których identyfikują osoby narażo-

ne na działanie danego czynnika oraz osoby nienarażone, a następnie obserwują, w której grupie z upływem czasu występuje dany punkt końcowy (np. zachorowanie). W badaniach kliniczno-kontrolnych wybiera się pacjentów, u których dany punkt końcowy już wystąpił (np. osoby z utratą słuchu), a następnie do każdego z nich dobiera się jednego lub kilku pacjentów, u których ten stan nie wystąpił. Następnie, szacując i porównując ekspozycję na dany czynnik w przeszłości, można ocenić jego potencjalny wpływ na wystąpienie danego zachorowania. W badaniach przekrojowych natomiast równocześnie gromadzi się dane dotyczące ekspozycji i występowania określonych zjawisk zdrowotnych, a następnie określa się potencjalne ich powiązanie, bez analizy związku przyczynowo-skutkowego.

Szczególną trudnością w projektowaniu badań dotyczących wpływu użytkowania telefonów komórkowych na zdrowie jest dokładna ocena ekspozycji. W idealnym badaniu ekspozycja na pole elektromagnetyczne powinna być oceniana na podstawie ciągłej rejestracji aktualnej energii absorbowanej przez ciało osoby badanej. W badaniach populacyjnych jednak metody takie nie są możliwe do zastosowania, w związku z czym stosowane są zamiast realnej ekspozycji inne parametry pozwalające ją oszacować. Przykładowo można wykorzystać łączny czas użytkowania telefonu komórkowego w ciągu dnia, analizować czas prowadzonych rozmów czy okres posiadania telefonu komórkowego. Tego rodzaju parametry także mogą być oceniane na różne sposoby. Aktualnie najbardziej obiektywną metodą oceny ekspozycji w badaniach populacyjnych jest analiza czasu rozmów na podstawie bilingów operatorów sieci komórkowych. Jako że metoda ta może być trudna w realizacji, większość dostępnych badań analizowała ekspozycję na podstawie różnego rodzaju kwestionariuszy, w których uczestnicy badania retrospektywnie szacowali czas użytkowania telefonu komórkowego w ciągu ostatnich dni. Metoda kwestionariuszowa obarczona jest jednak dużym ryzykiem błędu – systematycznego lub losowego. Błąd systematyczny polegać może na przykład na niedoszacowaniu czasu użytkowania telefonu komórkowego przez osoby rzadziej z nich korzystające (tzw. *lightusers*) oraz przeszacowaniu przez osoby, które korzystają z telefonu często (tzw. *heavyusers*) – w wyniku czego efekt wyliczony z danych uzyskanych w ten sposób jest większy niż w rzeczywistości. W przypadku błędu losowego badani losowo nie doszacowują lub przeszacowują czas korzystania z telefonu, na skutek czego następuje spłaszczenie efektu – tego rodzaju błąd można jednak zniwelować odpowiednim doбором rozmiaru próby badanej.

Co ciekawe, w przypadku analizy ekspozycji na pole elektromagnetyczne pochodzącego z telefonu komórkowego istotnym parametrem jest także informacja o dominującej stronie ciała badanego lub „dominującym uchu”. Dane eksperymentalne wskazują, że podczas rozmowy prowadzonej z urządzeniem mobilnym przy uchu nawet 97-99% energii jest absorbowane wyłącznie przez połowę

głowy, do której przyłożone było urządzenie. Zdecydowana większość badań nie analizuje tego parametru, a sama jego analiza także obarczona jest znacznym ryzykiem błędu.

Metodyka badań analizujących ekspozycję na pole elektromagnetyczne, w szczególności wytwarzane przez telefony komórkowe, jest bardzo zróżnicowana, stąd wyniki pojedynczych badań, mimo że analizujących podobne zależności, często znacznie różnią się od siebie. Staje się to powodem licznych dyskusji, co bez znajomości metodyki badań naukowych może prowadzić do wyciągania pochopnych i często nieprawidłowych wniosków.

Telefon komórkowy a narząd słuchu

Temat wpływu użytkowania telefonów komórkowych na narząd słuchu jest jednym z bardziej popularnych zagadnień w obrębie problematyki związanej z wpływem telefonii komórkowej na organizm człowieka. Problem ten jest szczególnie interesujący ze względu na bliskość, w jakiej telefon komórkowy używany jest w stosunku do narządu słuchu, a także przez ogromne rozpowszechnienie telefonów komórkowych. W związku z niewielką odległością ciała od telefonu komórkowego w czasie jego pracy popularne są obawy, że przewód słuchowy zewnętrzny może funkcjonować jako swoisty kanał prowadzący fale radiowe (falowód) w głąb ucha i bezpośrednio do centralnego układu nerwowego. Istnieją także przypuszczenia, że duża powszechność telefonów komórkowych i długość wykonywanych rozmów wpływać mogą na istotne zwiększenie ekspozycji na hałas od najmłodszych lat, co teoretycznie po dłuższym okresie użytkowania urządzenia mogłoby doprowadzić do upośledzenia słuchu [6].

Uproszczona anatomia i fizjologia narządu słuchu

Narząd słuchu w uproszczeniu podzielić możemy na trzy obszary anatomiczne: ucho zewnętrzne, ucho środkowe i ucho wewnętrzne. Do ucha zewnętrznego zaliczamy małżowinę uszną, przewód słuchowy zewnętrzny oraz zewnętrzną stronę błony bębenkowej. Ucho środkowe obejmuje jamę bębenkową, w świetle której znajdują się kosteczki słuchowe: młoteczek, kowadełko i strzemiączko. Dodatkowo do ucha środkowego zaliczamy wewnętrzną część błony bębenkowej, okienko owalne i okrągłe oraz trąbkę słuchową. Ucho wewnętrzne obejmuje ślimaka, trzy kanały półkolisty oraz woreczek i łagiewkę.

Ucho zewnętrzne ma za zadanie niejako przechwytywanie sygnałów akustycznych ze środowiska zewnętrznego, a następnie przewodzenie ich w kierunku błony bębenkowej, gdzie ulegają one wzmocnieniu. Małżowina uszna, dzięki swojej budowie anatomicznej, w efektywny sposób przechwytuje dźwięki i kieruje je do wnętrza przewodu słuchowego zewnętrznego, w którym na zasadzie rezonansu jest on wstępnie wzmocniany. W następnym etapie fale dźwiękowe wprawiają w drgania bło-

nę bębenkową, ta zaś przekazuje je na łańcuch kosteczek słuchowych zlokalizowany w uchu środkowym, na skutek czego fala mechaniczna ulega dodatkowemu wzmocnieniu. Z łańcucha kosteczek słuchowych drgania przekazywane są poprzez okienko owalne bezpośrednio do ślimaka, gdzie pobudzeniu ulegają właściwe komórki receptorowe narządu Cortiego – komórki rzęsate. Drgania odbierane przez receptory narządu Cortiego przekształcane są następnie w sygnał elektryczny, który poprzez nerw ślimakowy przekazywany jest do odpowiednich ośrodków w mózgu.

Metody oceny zmysłu słuchu stosowane w badaniach

Zanim fala akustyczna w formie sygnału elektrycznego zostanie przetworzona w odpowiednim ośrodku słuchowym w obrębie mózgu, musi być poddana odpowiedniemu wzmocnieniu i przekształceniom w obrębie narządu słuchu. Proces ten w uproszczeniu opisano wyżej. Na każdym z tych etapów dojść może do zaburzeń, które oceniane są z pomocą różnorodnych testów i badań. Dzięki wykorzystaniu różnorodnych technologii możemy oceniać poszczególne etapy drogi sygnału słuchowego, a przez to niezależnie i precyzyjnie zlokalizować miejsce ewentualnej patologii. Poniżej przedstawione zostaną metody diagnostyczne oraz parametry, które były używane i opisywane w badaniach nad wpływem użytkowania telefonów komórkowych na narząd słuchu:

- audiometria tonalna – metoda oceny progu słyszenia pacjenta (najcichszego dźwięku, jaki pacjent jest w stanie usłyszeć) dla różnych częstotliwości, osobno dla przewodnictwa powietrznego i kostnego (przewodnictwo powietrzne wykorzystuje aparat ucha środkowego do przewodzenia wibracji do ślimaka, przewodnictwo kostne polega natomiast na przewodnictwie sygnału do ślimaka za pośrednictwem kości czaszki);
- otoemisja akustyczna (ang. OtoAcoustic Emissions, OAEs) – stanowi grupę metod. Dzielimy ją na otoemisje spontaniczne (ang. Spontaneous OAEs, SOAEs) oraz wywołane (ang. Evoked OAEs, EOAEs). W dostępnej literaturze zagadnienia spotykamy analizy z wykorzystaniem dwóch typów EOAEs – otoemisje przejściowe (ang. Transiently EOAEs, TEOAEs) oraz emisje produktów niekształceń nieliniowych (ang. Distortion Product OAEs, DPOAEs). Obie metody służą do oceny funkcji komórek sensorycznych ucha wewnętrznego. Są one szeroko wykorzystywane w przesiewowych badaniach słuchu u noworodków.
- badanie słuchowych potencjałów wywołanych (ang. Auditory Evoked Potentials, AEP) – jest to metoda rejestracji sygnałów elektrycznych na poszczególnych etapach drogi słuchowej. Polega ona na stymulacji bodźcem dźwiękowym i rejestracji czasu od jego podania do rejestracji sygnału elektrycznego. W większości badań potencjały te rejestrowane były na powierzchni czaszki podczas stymulacji bodźcem słuchowym pochodzącym z telefonu komórkowego. Wyróżniamy różne rodzaje AEP, w dostępnych badaniach w tej tematyce stosowane były słuchowe potencjały wy-

wołane pnia mózgu (ang. Auditory Brainstem Response, ABR), słuchowe potencjały wywołane średniolatencyjne (ang. Middle Latency Responses, MLR) oraz potencjały niezgodności (ang. Mismatched Negativity, MN).

- badanie potencjałów wywołanych (ang. Event-Related Potentials, ERP) – metoda polegająca na rejestracji odpowiedzi elektrycznej różnych obszarów mózgu w reakcji na odpowiedni bodziec. Służy ocenie funkcji poznawczych, uwagi, pamięci i innych wyższych funkcji układu nerwowego.
- określanie objawów subiektywnych zgłaszanych przez pacjentów – część objawów pochodzących z narządu słuchu nie może być oceniona w sposób obiektywny przy pomocy dostępnych narzędzi. Przykład to szумы uszne, które w większości przypadków mają charakter subiektywny i nie mogą być fizycznie zmierzone. Do ich oceny używamy więc różnego rodzaju kwestionariuszy, optymalnie tych, które wcześniej zostały walidowane i zaakceptowane do użytku klinicznego. Pomagają one badaczom w ocenie charakteru i intensywności dolegliwości, a także pozwalają na obiektywne monitorowanie leczenia, nawet przez różnych specjalistów. Część badaczy, ze względu na charakter badania, używało metod subiektywnych (np. kwestionariuszy) do oceny np. pogorszenia słuchu – wykorzystywane jest to zwykle w badaniach na dużych populacjach.
- badania histologiczne, biochemiczne oraz mikroskopia elektronowa – biorąc pod uwagę istnienie potencjalnych klinicznie jawnych efektów ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości radiowych, przyczyn tych efektów należałoby szukać na poziomie molekularnym i komórkowym. Odkrycie zmian zachodzących na tym poziomie mogłoby pomóc badaczom zrozumieć patomechanizmy negatywnych procesów toczących się na skutek ekspozycji i przewidzieć ich kliniczne skutki. Do tego celu użyć można różnorodnych metod, poczynając od oznaczania stężenia związków w płynach tkankowych, po mikroskopię elektronową, która pozwala zobrazować poszczególne elementy komórkowe.
- badanie termograficzne – celem oceny zmiany temperatury małżowiny usznej oraz skóry w jej bezpośrednim sąsiedztwie autorzy używają kamery, która rejestruje dokładną temperaturę w określonych obszarach. Pozwala to na monitorowanie zmian temperatury skóry w różnych warunkach, zależnie od ekspozycji na ekspozycji na pole elektromagnetyczne wytwarzane przez telefon komórkowy.
- badanie innych parametrów: temperatura błony bębenkowej (mierzona na zewnętrznej części błony bębenkowej), temperatura w uchu środkowym i wewnętrznym, tympanometria, ocena krążenia krwi w obszarach mózgu odpowiedzialnych za przetwarzanie informacji słuchowych – testy używane rzadziej w badaniach nad wpływem telefonów komórkowych na narząd słuchu.

Podsumowanie dotychczasowych badań

Ucho zewnętrzne

W dotychczasowych badaniach ucho zewnętrzne, na które składa się małżowina uszna, przewód słuchowy zewnętrzny oraz zewnętrzna część błony bębenkowej, oceniane było na kilka sposobów. Biorąc pod uwagę efekty termiczne, występujące w tkankach po ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości radiowych, część autorów analizowała zmiany temperatury małżowiny usznej na skutek symulowanej ekspozycji, w obecności lub nieobecności pola emitowanego przez telefon komórkowy. Jak wykazało badanie na grupie 40-tu pacjentów, porównujące efekty termiczne w obszarze małżowiny usznej przy pomocy termografii, różnice w temperaturze skóry na skutek symulowanej rozmowy telefonicznej nie różniły się w sposób istotny statystycznie pomiędzy rzeczywistym połączeniem z siecią, a symulowaną rozmową z telefonem pracującym w tzw. trybie samolotowym. Wskazuje to na marginalny udział pola elektromagnetycznego o częstotliwościach mikrofalowych w generowaniu wzrostu temperatury w tym obszarze. Niemniej wzrost temperatury skóry na skutek bliskości urządzenia zupełnie wyłączonego jest istotny statystycznie, ale jego etiologia ma wieloczynnikowy charakter.

Innym ciekawym parametrem, analizowanym w kontekście ekspozycji na pole elektromagnetyczne wytwarzane przez telefon komórkowy, jest temperatura zewnętrznej części błony bębenkowej. Mierzy się ją przy pomocy specjalnych termometrów, z końcówką dopasowaną do części zewnętrznej przewodu słuchowego zewnętrznego, co jest szeroko stosowane w rutynowych pomiarach temperatury. Jest to metoda obciążona niskim ryzykiem błędu, a równocześnie prosta w wykonaniu i szybka. W pojedynczym badaniu przeprowadzonym w celu oceny wpływu ekspozycji na pole elektromagnetyczne wytwarzane przez telefon komórkowy na wyniki pomiaru, błona bębenkowa po stronie ekspozycyjnej miała średnio o $0,15^{\circ}\text{C}$ stopnia Celsjusza wyższą temperaturę w stosunku do strony nieekspozycyjnej. Ponadto różnic tych nie notowano w przypadku ekspozycji na telefon komórkowy nie emitujący fal radiowych. Różnice temperatur pomiędzy stroną ekspozycyjną i nieekspozycyjną narastały wraz z czasem ekspozycji i uzyskiwały maksymalne wartości po ok. 25-30 minutach ekspozycji.

Ucho środkowe

Niewiele jak dotąd powstało doniesień opisujących możliwe zmiany w obrębie ucha środkowego na skutek ekspozycji na promieniowanie radiowe pochodzące z telefonu. W literaturze znajdujemy pojedyncze doniesienia analizujące wyniki tympanometrii przed oraz po określonej ekspozycji, gdzie analizowanymi parametrami są głównie podatność błony bębenkowej oraz ciśnienie w uchu środkowym. W badaniu przeprowadzonym na grupie 23 osób nie wykazano istotnych zmian tych parametrów na skutek symulowanej ekspozycji.

Używając modeli oraz symulacji, autorzy analizowali także wpływ ekspozycji na temperaturę i energię absorbowaną w uchu środkowym. Pomimo obserwowanych zmian temperatury były one na tyle niskie, że potencjalne biologiczne efekty są według autorów mało prawdopodobne [7].

Zmiany progu słyszenia w audiometrii

W dotychczas prowadzonych badaniach upośledzenie słuchu było najczęściej analizowanym potencjalnym negatywnym efektem wpływu promieniowania na narząd słuchu. Najczęściej do tego celu używane było badania audiometryczne lub kwestionariuszowe. W metaanalizie z 2020 roku obejmującej to zagadnienie, gdzie przeanalizowano łącznie pięć badań przeprowadzonych z pomocą kwestionariuszy na ponad 90-ciu tysiącach badanych, wykazano brak powiązania pomiędzy używaniem telefonów komórkowych a upośledzeniem słuchu. W tym przypadku brano pod uwagę efekt długoterminowego używania telefonu, analizując szeroką populację [8].

W badaniu przeglądowym opublikowanym w roku 2021 autorzy zidentyfikowali 19 badań, w których analizowano wpływ używania telefonów komórkowych na parametry audiometrii. W 14-tu z tych badań analizowano wpływ długotrwałej ekspozycji, natomiast w pięciu z nich badanie audiometryczne wykonywane i porównywane było przed i bezpośrednio po symulowanej ekspozycji na promieniowanie telefonu komórkowego. W zdecydowanej większości badań analizujących krótkotrwałą ekspozycję autorzy nie znajdują żadnego powiązania między upośledzeniem słuchu a używaniem telefonu. Stąd wysnuć należy wniosek, że krótkotrwała ekspozycja na promieniowanie emitowane przez telefon komórkowy nie ma wpływu na parametry audiometrii. W przypadku analizy długoterminowej ekspozycji wyniki dotychczasowych badań w zdecydowanej większości wskazują na zwiększone ryzyko upośledzenia słuchu w populacji osób korzystających z telefonów komórkowych. Należy jednak brać pod uwagę fakt, że zdecydowana większość tych badań opublikowana była w czasopiśmie niskiej jakości, bez odpowiedniej weryfikacji metodologii i standardów naukowych. Niemniej w dwóch badaniach opublikowanych w wiodących czasopiśmie w dziedzinie otolaryngologii autorzy wykazują sprzeczne wyniki [9, 10]. Oba badania przeprowadzone były z włączeniem grupy kontrolnej złożonej z osób nigdy nie korzystających z telefonów komórkowych oraz z wykorzystaniem odpowiednich metod statystycznych z korektą na potencjalne czynniki zakłócające. Na podstawie literatury trudno jest dziś jednoznacznie potwierdzić bądź wykluczyć potencjalny związek upośledzenia słuchu i korzystania z telefonów komórkowych. Ponadto, jak opisano powyżej, korzystanie z telefonów komórkowych związane jest z istotnie zwiększoną ekspozycją na hałas, co może być związane z upośledzeniem słuchu, jednak w mechanizmie niezależnym od ekspozycji na promieniowanie elektromagnetyczne.

Innym aspektem upośledzenia słuchu, weryfikowanym przy pomocy audiometrii, jest nagła głuchota. Jest to nagłe (< 72 godzin) upośledzenie słuchu o co najmniej 30 dB w trzech kolejnych analizowanych

częstotliwościach. Zdecydowana większość przypadków jest jednostronna i występuje bez uchwytej przyczyny. W przeprowadzonych jak dotąd badaniach nie znaleziono jednak związku pomiędzy tym schorzeniem a korzystaniem z telefonów komórkowych [11, 12].

Występowanie szumów usznych

Szumy uszne definiowane są jako subiektywne doznania dźwiękowe odbierane przez pacjenta przy braku zewnętrznego źródła dźwięku. Dostępnych jest wiele badań analizujących potencjalne przyczyny szumów usznych, jednak ich przyczyny często nie udaje się ustalić. Powstało wiele analiz sprawdzających potencjalny związek pomiędzy występowaniem szumów usznych a korzystaniem z telefonów komórkowych. Wszystkie te dane zostały zebrane w formie metaanalizy (łączniej analizie matematycznej wyników wielu badań na ten sam temat), gdzie włączonych zostało sześć badań wysokiej jakości [13]. Opisane w metaanalizie prace były przeprowadzane z wykorzystaniem kwestionariuszy, gdzie w sposób subiektywny oceniano występowanie szumów usznych, a w części badań – także ekspozycję na promieniowanie pochodzące z telefonu komórkowego. Autorzy wskazali na brak statystycznie istotnych zależności pomiędzy występowaniem szumów usznych a korzystaniem z telefonów komórkowych we wszystkich przeprowadzonych projektach. Niemniej autorzy podkreślili kluczowe znaczenie wysokiej jakości dowodów niezbędnych do rzetelnego i pewnego wykluczenia potencjalnych związków przyczynowo-skutkowych.

Jednym z badań włączonych do powyższej metaanalizy była analiza przeprowadzona przez badaczy pochodzących ze Szwecji i Finlandii (badanie COSMOS), w której po przesłedzeniu bilingów 25-ciu tysięcy badanych nie wykazano istotnych zależności pomiędzy użytkowaniem telefonu komórkowego a występowaniem szumów usznych, pogorszeniem słuchu lub bólem głowy [13]. Analiza ta jest świetnym przykładem badania bardzo wysokiej jakości, przeprowadzonego zgodnie z najbardziej restrykcyjnymi standardami, które potrafi w sposób wyczerpujący odpowiedzieć na nurtujące i trudne pytania badawcze.

Otoemisje akustyczne

Dostępne są liczne dane analizujące wyniki badania otoemisji akustycznych u osób korzystających z telefonów komórkowych. Większość z nich wskazuje, że zarówno przewlekła, jak i symulowana, krótkotrwała ekspozycja nie mają wpływu na wyniki DPOAE i TEOAE. Przeprowadzone były w tym zakresie dwa duże wieloosrodkowe badania: EMFnEAR oraz GUARD, analizujące odpowiednio 20-minutową i 10-minutową ekspozycję na fale radiowe (UMTS, odpowiednio 1947 MHz oraz 900 MHz) emitowane przez telefon komórkowy pracujący z maksymalną mocą nadajnika [14, 15]. Autorzy tych badań, analizując rozliczne parametry słuchowe, nie wskazali na żadne istotne różnice w analizowanych parametrach przed i po ekspozycji. Wyniki tych doświadczeń były także potwierdzone przez polskie badanie [16].

Potencjały wywołane

Często sprzeczne są też wyniki badań dotyczących zmian w wynikach potencjałów wywołanych. Dowodów zebranych w jednym z ostatnich przeglądów systematycznych wskazują na brak zależności pomiędzy krótko- lub długotrwałą ekspozycją na fale radiowe emitowane przez telefon komórkowy a aktywnością mózgu lub funkcją drogi słuchowej, rejestrowanej za pomocą potencjałów wywołanych. Parametry te były badane także w ramach dużych wielośrodkowych badań wspomnianych wcześniej – GUARD oraz EMFnEAR. Oba projekty nie wykazały istotnych statystycznie różnic w rejestrowanych parametrach w obecności i bez obecności pola elektromagnetycznego pochodzącego z telefonu komórkowego.

Ocena histologiczna, biochemiczna oraz mikroskopia elektronowa

Badania w zakresie tych parametrów są zdecydowanie najbardziej obszerne i zawiłe, a ich dokładne omówienie znacznie przekraczałoby ramy tego opracowania. Podkreślić należy jednak, że w literaturze istnieją liczne dowody, oparte głównie na badaniach zwierzęcych i badaniach na komórkach ludzkich *in vitro*, wskazujące na zwiększone ryzyko apoptozy (śmierci komórkowej) oraz uszkodzeń komórek zmysłowych ślimaka na skutek ekspozycji na pole elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości radiowych. Jak pokazały badania eksperymentalne, wzrost temperatury w uchu wewnętrznym na skutek ekspozycji jest na tyle mały, że jakiegokolwiek efekty biologiczne są mało prawdopodobne. Wskazuje się więc potencjalne inne, nietermiczne mechanizmy prowadzące do uszkodzenia i degeneracji komórek, m. in. upośledzenie syntezy neurotransmiterów, zwiększony stres oksydacyjny czy zmniejszoną ilość czynników neurotroficznymi i neuroprotektynnymi. Pomimo napływających dowodów naukowych na zmiany określonych parametrów na skutek ekspozycji rzeczywiste znaczenie tych odchyłeń nie jest pewne. Doświadczenia w warunkach laboratoryjnych są często wykonywane przy natężeniach pola elektromagnetycznego kilkunastokrotnie lub nawet kilkusetkrotnie wyższych niż aktualnie obowiązujące poziomy dopuszczalne. Dodatkowo przeprowadzane badania często nie znajdują potwierdzenia przy próbie ich replikacji, co stawia pod znakiem zapytania rzetelność danego doświadczenia. Niemniej, mając na uwadze dotychczasowe dowody naukowe, konieczne są dalsze, dobrze zaprojektowane i precyzyjne badania mogące potwierdzić ewentualne zmiany molekularne i wyjaśnić ich długofalowe konsekwencje.

Podsumowanie

Aktualnie w literaturze światowej istnieje bardzo wiele doniesień analizujących potencjalny związek pomiędzy określonymi parametrami opisującymi funkcję zmysłu słuchu a ekspozycją na pole elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych emitowanych przez telefon komórkowy. Związki te analizowano pod kątem zarówno długofalowej, jak i krótkofalowej ekspozycji, zarówno

na zwierzętach, jak i ludziach, w warunkach laboratoryjnych, jak i w naturalnym, codziennym środowisku. Wydaje się, że dostępne są dane związane z niemal każdym aspektem opisującym funkcję zmysłu słuchu w analizowanym kontekście. Pomimo bardzo szerokiej i różnorodnej literatury więszość dostępnych badań cechuje się niską jakością i należy interpretować je z dużą ostrożnością.

Dostępne wyniki wskazują na potencjalny związek pomiędzy użytkowaniem telefonów komórkowych a podwyższeniem progu słyszenia, szczególnie u osób korzystających z telefonów komórkowych przez długi czas. Zależność ta może być jednak związana nie tyle z ekspozycją na fale radiowe pochodzące z telefonu komórkowego, ile ze zwiększoną ekspozycją na hałas w tej grupie osób.

Wyniki badań dotyczących innych parametrów nie dostarczają pewnych dowodów wskazujących na negatywne skutki korzystania z telefonów komórkowych. W związku ze stosunkową dużą liczbą dostępnych danych szczególną uwagę zwrócić należy na badania analizujące potencjalne podłoże molekularne i patofizjologię procesów mogących być skutkiem ekspozycji na pole elektromagnetyczne emitowane przez telefony komórkowe.

Bibliografia

1. Kemp S. Global Digital Overview [Internet]. 2021. Available from: <https://datareportal.com/global-digital-overview>
2. Telekomunikacja w 2019 roku. Główny Urząd Stat. 2020;
3. Łamża Ł, editor. Pole elektromagnetyczne a człowiek. O fizyce, biologii, medycynie, normach i sieci 5G. Warszawa; 2019.
4. Thielens A, Bockstael A, Declerck S, Aminzadeh R, Aerts S, Botteldooren D, et al. Mobile phones: A trade-off between speech intelligibility and exposure to noise levels and to radio-frequency electromagnetic fields. *Environ. Res.* [Internet] 2019;175:1–10. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935119302580>
5. Rok T, Basta-Klonowska K, Lisowski B, Tatoń G, Rokita E. Termiczne efekty oddziaływania smartfonu na małżowinę uszną. *Przeгляд Elektrotechniczny* 2020;1:198–201. DOI 10.15199/48.2020.01.44
6. Ana GREE, Ukhun AE, Shendell DG, Osisanya PA. Acute, Repeated Exposure to Mobile Phone Noise and Audiometric Status of Young Adult Users in a University Community. Zurriaga O, Askarian M, editors. *ISRN Public Health* [Internet] International Scholarly Research Network; 2012;2012:241967. Available from: <https://doi.org/10.5402/2012/241967>
7. Schmid G, Uberbacher R, Samaras T, Jappel A, Baumgartner W-D, Tschabitscher M, et al. High-resolution numerical model of the middle and inner ear for a detailed analysis of radio frequency absorption. *Phys. Med. Biol. England*; 2007 Apr;52(7):1771–81. DOI 10.1088/0031-9155/52/7/001
8. Taziki Balajelini MH, Mohammadi M, Rajabi A. Association between mobile phone use and hearing impairment: a systematic review and meta-analysis. *Rev. Environ. Health* [Internet] 2021; Available from: <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0062>
9. Panda NK, Modi R, Munjal S, Virk RS. Auditory changes in mobile users: is evidence forthcoming? *Otolaryngol. neck Surg. Off. J. Am. Acad. Otolaryngol. Neck Surg. England*; 2011 Apr;144(4):581–5. DOI 10.1177/0194599810394953
10. Bhagat S, Varshney S, Bist SS, Goel D, Mishra S, Jha VK. Effects on auditory function of chronic exposure to electromagnetic fields from mobile phones. *Ear. Nose. Throat J. United States*; 2016 Aug;95(8):E18-22.
11. Sagiv D, Migirov L, Madgar O, Nakache G, Wolf M, Shapira Y. Mobile phone usage does not

- affect sudden sensorineural hearing loss. *J. Laryngol. Otol.* [Internet] 2017/11/28. Cambridge University Press; 2018;132(1):29–32. Available from:
<https://www.cambridge.org/core/article/mobile-phone-usage-does-not-affect-sudden-sensorineural-hearing-loss/C39A7853D50B3C1E6E7659FE6230720D>
12. Chau JK, Lin JRJ, Atashband S, Irvine RA, Westerberg BD. Systematic review of the evidence for the etiology of adult sudden sensorineural hearing loss. *Laryngoscope United States*; 2010 May;120(5):1011–21. DOI 10.1002/lary.20873
 13. Auvinen A, Feychting M, Ahlbom A, Hillert L, Elliott P, Schüz J, et al. Headache, tinnitus and hearing loss in the international Cohort Study of Mobile Phone Use and Health (COSMOS) in Sweden and Finland. *Int. J. Epidemiol.* 2019 Oct;48(5):1567–79. DOI 10.1093/ije/dyz127
 14. Parazzini M, Sibella F, Lutman ME, Mishra S, Moulin A, Sliwinska-Kowalska M, et al. Effects of UMTS Cellular Phones on Human Hearing: Results of the European Project “EMFnEAR.” *Radiat. Res.* [Internet] The Radiation Research Society; 2009 Aug 1;172(2):244–51. Available from: <https://www.rrjournal.org/doi/abs/10.1667/RR1679.1>
 15. Parazzini M, Brazzale AR, Paglialonga A, Tognola G, Collet L, Moulin A, et al. Effects of GSM cellular phones on human hearing: the European project “GUARD”. *Radiat. Res. United States*; 2007 Nov;168(5):608–13. DOI 10.1667/RR1020.1
 16. Kacprzyk A, Kocoń S, Składzień J, Rokita E, Pawlak R, Kwiecień J, et al. Does the short-term exposure to radiofrequency electromagnetic field originating from mobile phone affect auditory functions as measured by Acoustic Admittance and Evoked Otoacoustic Emission tests? *Electromagn. Biol. Med.* Taylor & Francis; DOI 10.1080/15368378.2020.1826960