Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2024, 1(119), 7–27 https://doi.org//10.54215/PiMOSP/1.119.2024
Nadesłano/Received: 12.12.2023
Przyjęto do druku/Accepted: 18.12.2023

CC BY ND

PRACA ORYGINALNA / ORIGINAL PAPER

Warunki koegzystencji ludzi z infrastrukturą elektromagnetycznych technologii radiokomunikacyjnych w wybranych mikrośrodowiskach[1]

Conditions of people coexisting with the infrastructure of electromagnetic mobile communication technologies in selected microenvironments[1]

JOLANTA KARPOWICZ
https://orcid.org/0000-0003-2547-2728
e-mail: jokar@ciop.pl

KRZYSZTOF GRYZ
https://orcid.org/0000-0001-5655-2187

PATRYK ZRADZIŃSKI
https://orcid.org/0000-0001-8094-0761

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Streszczenie

Opracowano diagnozę warunków koegzystencji wybranych grup pracujących z infrastrukturą elektromagnetycznych technologii radiokomunikacyjnych powodujących emisję radiofal w środowisku pracy i życia. Przeprowadzono analizę zagrożeń elektromagnetycznych w kontekście rozwoju tych technologii oraz ewolucji sposobu ich użytkowania i warunków oddziaływania elektromagnetycznego na pracowników i ludność w typowych mikrośrodowiskach: (i) pociągów osobowych, (ii) centrów handlowych i (iii) pojazdów samochodowych. Wykazano istotnie zróżnicowane kierunki zmian warunków narażenia na radiofale w ostatnich 5 latach (2018-2023), przy nieznacznych zmianach poziomu całkowitego narażenia w środowisku pracy dostępnym dla pracowników i ludności, powiązane z upowszechnieniem mobilnego dostępu do szybkiego przesyłania danych i przyspieszenia ich transmisji z urządzeń osobistych (smartfonów, tabletów). W centrach handlowych zaobserwowano dominujący udział składowych *downlink* narażenia (ze stacji bazowych) oraz poszerzenie jego pasma częstotliwości (o pasma LTE: 2100 i 2600 MHz) przy obniżeniu udziału składowych *uplink* (z terminali) i marginalizacji narażenia związanego z lokalnymi hotspotami sieci nieabonamentowych (Wi-Fi). W pociągach osobowych również zaobserwowano poszerzenie pasma częstotliwości, ale przy dominującym udziale składowych *uplink* narażenia, niezależnie od dostępności lokalnych hotspotów. W pojazdach samochodowych w narażeniu pochodzącym z zewnętrznych źródeł radiofal (składowe *downlink*) także zaobserwowano poszerzenie pasma jego częstotliwości (o pasma LTE: 800 i 2600 MHz).

[1] Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy", finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (do 12 grudnia 2023 r. – pod nazwą: Ministerstwo Rodziny i Polityki Społecznej). Zadanie nr 3.ZS.14 pt. „Badanie i ocena warunków koegzystencji człowieka z urządzeniami w świecie technologii elektromagnetycznych w ramach Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności (EM-Centrum)". Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

This paper was made and published on the basis of results of a research task carried out within the scope of the 6th stage of the national programme "Governmental Programme for Improvement of Safety and Working Conditions", funded by state services of the Ministry of Family, Labour and Social Policy (under the name of the Ministry of Family and Social Policy prior to December 12th, 2023). Task no. 3.ZS.14 entitled "Research and assessment of the conditions of people coexisting with devices in the world of electromagnetic technologies as part of the Center for Research and Promotion of Electromagnetic Safety of Workers and Population (EM-Centrum)". The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme's main co-ordinator.

We wszystkich mikrośrodowiskach stwierdzono zmniejszenie fluktuacji narażenia w czasie. W analizowanych typach mikrośrodowisk konieczne są więc odmienne środki ograniczania narażenia pracowników, a także różne metody rozpoznania i oceny jego parametrów.

Słowa kluczowe: promieniowanie elektromagnetyczne, narażenie pracowników, zagrożenia elektromagnetyczne.

Abstract

This is a study of how people coexisting with the infrastructure of electromagnetic mobile communication technologies emitting radio waves in the work and living environment: (i) in passenger trains, (ii) in shopping centres and (iii) in passenger cars. It revealed significantly different trends, over the last five years (2018-2023), in the structure of exposure to radio waves, with slight changes in the level of total exposure in analysed environments used by workers and the public. The observed changes are related to the spread of mobile access to fast data transfer and increased speed of transmission from personal devices (terminals such as smartphones or tablets). The results from shopping centres showed dominant downlink-components of exposure (from base stations) and a broadening of their frequency band (due to the spread of LTE subscription services using the 2100 and 2600 MHz bands) in 2023, along with reduced uplink-components (from terminals) and components related to local hotspots of non-subscription networks (Wi-Fi). A broadening of the frequency band was also observed in measurements from passenger trains, but with the dominant uplink-components of exposure, regardless of the availability of local hotspots. In passenger cars, exposure to external radio waves (downlink components) also broadened in the frequency band (in the LTE 800 and 2600 MHz bands). A reduction in exposure fluctuations over time was found in all the studied microenvironments. This implies that different measures are necessary to reduce workers' exposure, along with different methods of identifying and assessing the parameters there.

Keywords: electromagnetic radiation, workers exposure, electromagnetic hazards.

Adres do korespondencji/Contact details: Jolanta Karpowicz, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16, e-mail: jokar@ciop.pl

WPROWADZENIE

Użytkowaniu wszelkich instalacji i urządzeń zasilanych elektrycznie nierozerwalnie towarzyszy narażenie środowiska pracy i życia codziennego na pole elektromagnetyczne (**pole-EM**). Wraz z rozwojem technologii elektromagnetycznych narażenie to stopniowo się zmienia ze względu na ewolucję parametrów pola-EM emitowanego przez źródła nowego typu lub nowe okoliczności narażenia osób wykorzystujących te źródła, przebywających w otoczeniu źródeł użytkowanych przez inne osoby lub zlokalizowanych w pobliżu. Dynamiczny rozwój technologii wykorzystujących procesy elektromagnetyczne, którego skutki dla bezpieczeństwa i zdrowia pracowników wymagają monitorowania, obejmuje m.in.: radiofalowy lub mikrofalowy bezprzewodowy transfer informacji w systemach takich jak szybki, bezprzewodowy dostęp do zasobów Internetu, sieci radiokomunikacyjne nowej generacji, przemysł 4.0 (czyli działalność przemysłowa w zakładach produkcyjnych zintegrowana ze wspomagającymi technologiami, takimi jak: internet rzeczy, przetwarzanie w chmurze, algorytmizacja i uczenie maszynowe).

INTRODUCTION

The use of all electrically powered installations and devices is inseparably accompanied by exposure of the working and everyday life environment to an electromagnetic field (**EMF**). This field has gradually changed over time with the development of electromagnetic technologies, due to the evolution of the parameters of the EMF emitted by new types of sources, or the circumstances in which people using these sources are exposed, namely being in the vicinity of sources used by other people or located nearby. The dynamic development of technologies using electromagnetic processes, the effects of which on the safety and health of workers require monitoring, include: radio waves and microwave wireless information transfer in systems such as fast, wireless access to internet resources, new generation communication networks, industry 4.0 (i.e. industrial activities in production plants integrated with supporting technologies such as the Internet of Things, cloud computing, algorithmisation and machine learning) and others.

ODDZIAŁYWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE ZE ŚRODOWISKIEM

Kluczowe właściwości pola-EM traktowanego jako czynnik fizyczny środowiska (bądź nawet jeden z parametrów jakości powietrza) to:

- propagacja (rozprzestrzenianie się) energii elektromagnetycznej w postaci pola-EM (fali-EM, promieniowania-EM) w próżni i powietrzu z prędkością światła, a w innych środowiskach z mniejszą prędkością (uzależnioną od ich parametrów dielektrycznych) oraz
- zdolność indukowania różnicy potencjałów (napięć elektrycznych) i w konsekwencji prądów elektrycznych lub dipoli elektrycznych w obiektach materialnych (w tym w organizmach żywych), (*Bieńkowski* i in. 2016; *Karpowicz* i in. 2008a; *Korniewicz* i in. 2001; *Zradziński* 2016).

Tworzenie różnych technologii elektromagnetycznych wykorzystuje przeważnie zjawiska towarzyszące indukowaniu potencjałów elektrycznych w obiektach materialnych pod wpływem oddziaływania zmiennego w czasie pola-EM, które może spowodować wzrost temperatury takiego obiektu oraz zakłócenia zachodzących w nim procesów elektrycznych (niezależnie od tego, czy jest to obiekt biologiczny, czy urządzenie elektryczne). Z powodu takich skutków oddziaływania pola-EM wymagany jest nadzór nad środowiskiem elektromagnetycznym ze względu na zagrożenia związane z wykorzystaniem technologii elektromagnetycznych, ewolucją ich parametrów technicznych oraz okolicznościami użytkowania (*Bieńkowski* i in. 2016; 2020; *Korniewicz* i in. 2001; SCENIHR 2015; *Zmyślony* i in. 2020; *Zradziński* i in. 2022a). W ramach takiego monitoringu rozpatruje się przede wszystkim parametry środowiska elektromagnetycznego, które można skorelować ze skutkami oddziaływania pola-EM na obiekty materialne albo ocenić w środowisku poprzez pomiary bądź na podstawie szacunków analitycznych wykorzystujących parametry techniczne jego źródeł przy marginalnym wykorzystaniu wyników symulacji komputerowych wykorzystujących parametry techniczne źródeł pola-EM (*Bieńkowski* i in. 2016; *Karpowicz* i in. 2008b; *Zradziński* 2015; 2016).

ELECTROMAGNETIC INTERACTION WITH THE ENVIRONMENT

The key properties of EMF, treated as a physical factor of the environment (or even one of the air quality parameters), are:

- the propagation (spread) of electromagnetic energy in the form of an EMF (EM wave, EM radiation) in vacuum and air at the speed of light, and in other environments at a lower speed (depending on their dielectric parameters), and
- the ability to induce potential differences (electric voltages), and consequently electric currents or electric dipoles, in material objects (including living organisms) (*Bieńkowski* et al. 2016; *Karpowicz* et al. 2008a; *Korniewicz* et al. 2001; *Zradziński* 2016).

The creation of various electromagnetic technologies usually uses phenomena accompanying the induction of electric potentials in material objects under the influence of a time-varying EMF, which may cause an increase in the temperature of the object and a malfunction in electrical processes occurring in it (regardless of whether it is a biological object or an electrical device). Due to these effects of EMF interaction, supervision over the electromagnetic environment is required due to the hazards related to the use of electromagnetic technologies, the evolution of their technical parameters and the circumstances of use (*Bieńkowski* et al. 2016; 2020; *Korniewicz* et al. 2001; SCENIHR 2015; *Zmyślony* et al. 2020; *Zradziński* et al. 2022a). Monitoring primarily concerns the parameters of the electromagnetic environment, which can be correlated with the effects of the EMF on material objects or assessed in the environment through measurements, or on the basis of analytical estimates using the technical parameters of its sources, with marginal use of the results of computer simulations using the technical parameters of the EMF sources (*Bieńkowski* et al. 2016; *Karpowicz* et al. 2008b; *Zradziński* 2015; 2016).

SIECI RADIOKOMUNIKACYJNE

Od wielu dziesięcioleci systemy radiokomunikacyjne dynamicznie rozwijają się w Polsce, szczególnie w miarę wprowadzania nowych technologii łączności mobilnej, umożliwiających obecnie korzystanie z usług zapewniających m.in.: komunikację głosową, odbiór sygnału radiowo-telewizyjnego i przesyłanie danych za pośrednictwem publicznych abonamentowych sieci telefonii mobilnej. Zakres dostępnych usług, szczególnie telefonii mobilnej, ewoluował w miarę rozwoju technologii telekomunikacyjnych, wzrastania liczby użytkowników i ich nowych oczekiwań dotyczących jakości usług – poczynając od połączeń głosowych w standardzie 1G (analogowym standardzie pierwszej generacji, użytkowanym od 1992 r.), poprzez najpopularniejszy obecnie standard 4G/LTE (ang. *Long Term Evolution*), pozwalający na efektywne korzystanie z zasobów Internetu i różnorodnych aplikacji, aż do wdrażanego teraz stopniowo standardu sieci nowej generacji (tzw. sieci 5G), który ma umożliwić jednoczesną obsługę znacznie większej liczby użytkowników oraz poprawić możliwość masowej komunikacji między urządzeniami, np. internetu rzeczy (ang. *Internet of Things, IoT*), zalgorytmizowanych instalacji przemysłu 4.0 czy autonomicznych pojazdów (*Zradziński* i in. 2021; 2022a; 2022b).

Funkcjonowanie systemów radiokomunikacyjnych i bezprzewodowy transfer danych między urządzeniami odbywają się dzięki propagacji zmodulowanej energii promieniowania elektromagnetycznego, najczęściej z pasma częstotliwości określanego jako radiofale lub mikrofale (*Bieńkowski* i in. 2017; *Zradziński* i in. 2022a). Emisja promieniowania elektromagnetycznego z anten nadawczych, zależna od konfiguracji poszczególnych systemów, determinuje ich kluczowe parametry użytkowe (takie jak: charakterystyki częstotliwościowe i przestrzenne promieniowania, zasięgi niezakłóconej łączności bezprzewodowej, obsługiwane rodzaje usług telekomunikacyjnych). Przesyłanie informacji w systemach radiokomunikacji mobilnej na znaczne odległości (do kilku–kilkunastu kilometrów) z reguły jest realizowane za pośrednictwem sieci anten tzw. stacji bazowych BTS (ang. *Base Transceiver Station*), umieszczanych na wolnostojących masztach lub dachach budynków (fot. 1a). W systemach łączności bliskiego zasięgu (np. Bluetooth i Wi-Fi – ang. *Wireless Fidelity*, zapewniających łączność o zasięgu do

MOBILE COMMUNICATION NETWORKS

For many decades, mobile communication systems have been developing dynamically in Poland, especially with the introduction of new mobile communication technologies, which now enable the use of services providing, among other things, voice communication, reception of radio and television signals and data transmission via public subscription mobile communication networks. The scope of available services, especially mobile communication networks, has evolved with the development of telecommunications technologies, the increasing number of users and their new expectations regarding the quality of services – starting with voice calls in the 1G standard (an analogue standard of the first generation, used since 1992), through the currently most popular 4G/LTE standard (Long Term Evolution), allowing for the effective use of internet resources and various applications, up to the new generation network standard (the 5G network) gradually being implemented, which will enable the simultaneous service of a much larger number of users and improve the possibility of mass communication between devices, e.g. the Internet of Things (IoT), algorithmised industry 4.0 installations and autonomous vehicles (*Zradziński* et al. 2021; 2022a; 2022b).

The functioning of mobile communication systems and wireless data transfer between devices take place through the propagation of modulated energy of electromagnetic radiation, most often from the frequency band referred to as radio waves or microwaves (*Bieńkowski* et al. 2017; *Zradziński* et al. 2022a). The emission of electromagnetic radiation from transmitting antennas, depending on the configuration of particular systems, determines their key operational parameters (such as: the frequency and spatial characteristics of radiation, the ranges of uninterrupted wireless communication and the supported types of telecommunications services). Sending information in mobile communication systems over long distances (up to several kilometres) is usually carried out via a network of antennas known as base stations (BTS, Base Transceiver Station), placed on free-standing masts or building roofs (Photo 1a). Short-range communication systems (e.g. Bluetooth and Wi-Fi (Wireless Fidelity), providing communication with a range of several metres to

kilku–kilkudziesięciu metrów) wykorzystuje się anteny umieszczane bezpośrednio w urządzeniach mobilnych (terminalach) łączących się ze sobą bezpośrednio (smartfony, tablety, smartwatche itp.) lub anteny zamocowane w pobliżu na stałe (np. routery Wi-Fi zamontowane wewnątrz pomieszczeń), pełniące funkcję punktu dostępu komunikacyjnego, czyli tzw. hotspotu (bezpośrednio między urządzeniami znajdującymi się na niewielkim obszarze lub między tymi urządzeniami a siecią źródłową: lokalną siecią komunikacyjną lub siecią telefonii mobilnej i zasobami Internetu), (fot. 1b).

Systemy radiokomunikacyjne wykorzystują radiofale o przypisanych administracyjnie poszczególnym systemom pasmach częstotliwości (Rozporządzenie RM 2013; UKE 2018). W konsekwencji rozpoznanie poszczególnych pasm częstotliwości w narażeniu na radiofale w analizowanym mikrośrodowisku determinuje również ich sposób wykorzystania. Najstarszy system mobilnej komunikacji cyfrowej 2G, tzw. GSM 900 (ang. *Global System for Mobile Communications*), wykorzystywał początkowo (od 1996 r.) pasmo 900 MHz do komunikacji głosowej (*Bieńkowski* 2023a; *Gryz* i in. 2021a; 2021b; 2022a; *Karpowicz* i in. 2021). Pojawiające się zapotrzebowanie na nowe rodzaje usług i ich stopniowe upowszechnianie stymuluje ewolucję techniczną

tens of metres) use antennas placed directly in mobile devices (terminals) that connect directly to each other (smartphones, tablets, smartwatches, etc.) or permanently installed antennas nearby (e.g. Wi-Fi routers installed indoors), serving as a communication access point, i.e. what is known as a hotspot (directly between devices located in a small area or between these devices and the source network: local communication network or mobile communication network and internet resources) (Photo 1b).

Mobile communication technologies use radio waves with frequency bands administratively assigned to particular systems (Rozporządzenie RM 2013; UKE 2018). Consequently, the recognition of particular frequency bands in exposure to radio waves in the analysed microenvironment also determines their method of use. The oldest 2G mobile digital communication system, known as GSM 900 (Global System for Mobile Communications) initially used (since 1996) the 900 MHz band for voice communication (*Bieńkowski* 2023a; *Gryz* et al. 2021a; 2021b; 2022a; *Karpowicz* et al. 2021). The emerging demand for new types of services and their gradual dissemination stimulated the technical evolution of such systems, e.g. towards increasing the amount of

a)

b)

Fotografia 1. Przykładowe anteny: a) BTS na dachu budynku; b) router Wi-Fi na ścianie wewnątrz pomieszczenia (lokalny hotspot radiokomunikacyjny) [źródło: zbiory własne]
Photo 1. *Example antennas: a) BTS on the roof of the building; b) Wi-Fi router under the ceiling inside the room (local radio communication hotspot) [source: authors' collection]*

takich systemów, np. w kierunku zwiększenia ilości i szybkości przesyłanych informacji. W związku z tym do wykorzystania przez systemy radiokomunikacyjne przeznaczane są stopniowo kolejne pasma częstotliwości. Działająca w Polsce abonamentowa, publiczna telefonia mobilna wykorzystuje obecnie pasma częstotliwości: 800, 900, 1800, 2100 i 2600 MHz. Dalszy rozwój publicznych sieci radiokomunikacji mobilnej przewiduje wykorzystanie w najbliższych latach również pasma częstotliwości 700 MHz (użytkowanego do 2022 r. przez telewizję naziemną) oraz pasma 3600 MHz (przesuniętego do komercyjnego użytkowania od jesieni 2023 r.). Oprócz abonamentowych sieci telefonii mobilnej, do połączeń między urządzeniami wykorzystuje się również nieabonamentowe systemy łączności bezpośredniej (np. w systemie Bluetooth wykorzystującym pasmo 2,4 GHz) lub pośredniczące punkty dostępowe lokalnych sieci Wi-Fi (wykorzystujące komunikację w pasmach częstotliwości 2,4 GHz lub 5 GHz).

Ewolucja parametrów technicznych systemów radiokomunikacyjnych obejmuje również rekonfigurację sposobu użytkowania poszczególnych pasm częstotliwości. Pasma 900 i 1800 MHz, przeznaczone pierwotnie do połączeń głosowych w ramach systemu GSM, z szerokością kanału transmisji ok. 200 kHz, zostały stopniowo (od 2018 r.) udostępnione również do transmisji danych w ramach wprowadzanej sukcesywnie od 2011 r. technologii LTE (z szerokością kanału transmisji: 5–50 MHz – zależnie od pasma częstotliwości i dostawcy usługi), (UKE 2018).

Obecnie wszystkie wspomniane pasma publicznej telefonii mobilnej zostały udostępnione do transmisji informacji w systemie LTE, w trybie FDD (ang. *Frequency Division Duplex*) z rozdzielonymi pasmami częstotliwości transmisji sygnału ze stacji bazowej do terminalu (DL – *downlink*) oraz z terminalu do stacji bazowej (UL – *uplink*), (*Bieńkowski* i in. 2017; *Bieńkowski* 2023a). W 2018 r. w Polsce uruchomiono w technologii LTE również transmisję danych w paśmie częstotliwości 2600 MHz w trybie TDD (ang. *Time Division Duplex*), z szerokością kanału transmisji sygnału do i ze stacji bazowej 50 MHz, w rozdzielonych przedziałach czasowych (UKE 2018). Transmisja sygnałów UL i DL w tym samym paśmie częstotliwości wykorzystywana jest również w systemach Wi-Fi i Bluetooth oraz przygotowywanym do użytkowania systemie 5G3600 (z szerokością kanału do 100 MHz), (*Gryz* i in. 2022a).

information transferred and the speed. Therefore, subsequent frequency bands are gradually allocated for use by mobile communication systems. The subscription public mobile communication operating in Poland currently uses the following frequency bands: 800, 900, 1800, 2100 and 2600 MHz. The further development of public mobile communication networks envisages the use in the coming years of the 700 MHz frequency band (used by terrestrial television until 2022) and the 3600 MHz band (which was shifted to commercial use from autumn 2023). In addition to subscription mobile communication networks, there are non-subscription direct communication technologies (e.g. in the Bluetooth system using the 2.4 GHz band) and intermediary access points of local Wi-Fi networks (using communication in the 2.4 GHz or 5 GHz bands).

The evolution of the technical parameters of mobile communication systems also includes the reconfiguration of the use of particular frequency bands. The 900 and 1800 MHz bands, originally intended for voice calls within the GSM system, with a transmission channel width of approximately 200 kHz, have been gradually (since 2018) made available for data transmission as part of the LTE technology introduced successively since 2011 (with a transmission channel width of 5–50 MHz – depending on the frequency band and service provider) (UKE 2018).

Currently, all these public mobile communication bands have been made available for information transmission in the LTE system, in the FDD (Frequency Division Duplex) mode, with separated frequency bands for signal transmission from the BTS to the personal device (DL – downlink) and from the personal device to the BTS (UL – uplink) (*Bieńkowski* et al. 2017; *Bieńkowski* 2023a). In 2018, LTE technology also launched in Poland, with the data transmission in the 2600 MHz frequency band in the TDD (Time Division Duplex) mode, with a signal transmission bandwidth to and from the BTS of 50 MHz, in separated time slots (UKE 2018). The UL and DL transmission in the same frequency band is also used in Wi-Fi and Bluetooth systems and the 5G3600 (with signal transmission bandwith up to 100 MHz) system being prepared for use (*Gryz* et al. 2022a).

CEL BADAŃ

Celem badań było scharakteryzowanie warunków koegzystencji wybranych grup pracujących z infrastrukturą elektromagnetycznych technologii radiokomunikacyjnych, powodujących emisję radiofal w środowisku pracy i życia, na podstawie rozpoznania i analizy parametrów emitowanego pola-EM oraz warunków jego oddziaływania na pracowników i ludność w wybranych mikrośrodowiskach (w kontekście zależności warunków tego oddziaływania od rozwoju takich technologii i ewolucji sposobu ich użytkowania).

Do szczegółowego rozpoznania wybrano warunki koegzystencji ludzi z infrastrukturą elektromagnetycznych technologii radiokomunikacyjnych typowych mikrośrodowisk przebywania pracowników i ludności: (i) pociągów osobowych, (ii) centrów handlowych i (iii) pojazdów samochodowych, a także ich zależność od rozwoju tych technologii w latach 2018-2023.

THE AIM

The aim of the work was to characterise how people coexist with the infrastructure of electromagnetic mobile communication technologies emitting radio waves in the work and living environment, based on the recognition and analysis of the parameters of the emitted EMF and the conditions of its impact on workers and the public in selected microenvironments (in the context of the relationship between the conditions of this impact and the development of such technologies and the evolution of their use).

The typical microenvironments, selected for a detailed examination of the conditions in which people coexist with the infrastructure of electromagnetic mobile communication technologies, were as follows: (i) passenger trains, (ii) shopping centres and (iii) passenger cars, as well as their dependence on the development of these technologies in 2018-2023.

Tabela 1. Mobilne cyfrowe systemy komunikacyjne użytkowane w Polsce w latach 1996-2023 (Rozporządzenie RM 2013; UKE 2018)
Table 1. *Digital mobile communication systems used in Poland in 1996-2023 (Rozporządzenie RM 2013; UKE 2018)*

Oznaczenie *Symbols used*	Źródło pola-EM *EMF source*	Pasmo częstotliwości, *Frequency band,* MHz
	Publiczne abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne: *Public subscription mobile communication networks:*	
LTE800(UL;DL)	- LTE 800 – FDD: DL i/& UL	791–821 i/& 832–862
GSM900(UL;DL)	- GSM/LTE 900 – FDD: UL i/& DL	876–915 i/& 921–960
LTE1800(UL;DL)	- LTE 1800 – FDD: UL i/& DL	1710–1785 i/& 1805–1880
LTE2100(UL;DL)	- LTE 2100 – FDD: UL i/& DL	1920–1980 i/& 2110–2170
LTE2600(UL;DL;TDD)	- LTE 2600 – FDD: UL i/& DL	2500–2570 i/& 2620–2690
	- LTE 2600 – TDD	2570–2620
	Publiczne abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne nowej generacji (sieci wprowadzane do użytkowania komercyjnego w 2024 r.): *Next generation public subscription mobile communication networks (networks coming to the commercial use in 2024):*	
5G700	- 5G 700	694–790
5G3600	- 5G 3600	3400–3800
	Lokalne nieabonamentowe sieci łączności mobilnej między urządzeniami i lokalnego dostępu do Internetu (hotspoty): *Local non-subscription networks for mobile communication between devices and local Internet access points (hotspots):*	
WIFI2GHz	- Wi-Fi 2,4 GHz i/& Bluetooth	2400–2483
WIMAX	- WiMAX	3600–3800
WIFI5GHz	- Wi-Fi 5 GHz	5150–5350 i/& 5470–5725

Uwagi: W systemach pracujących w trybie FDD (*Frequency Division Duplex*) – rozdzielone częstotliwości transmisji sygnału ze stacji bazowej do terminalu (DL – *downlink*) oraz z terminalu do stacji bazowej (UL – *uplink*); w systemach pracujących w trybie TDD (*Time Division Duplex*) – pojedyncze pasmo częstotliwości rozdzielone w czasie transmisji sygnału do i ze stacji bazowej; Bluetooth (określenie pochodzące od króla duńskiego Haralda Sinozębego); GSM (*Global System for Mobile Communications*); LTE (*Long Term Evolution*); Wi-Fi (*Wireless Fidelity*); WiMAX *(Worldwide Interoperability for Microwave Access).*

Notes: In systems operating in FDD (Frequency Division Duplex) mode – separated signal transmission frequencies from the base station to the personal device (DL – downlink) and from the personal device to the base station (UL – uplink); in systems operating in TDD (Time Division Duplex) mode – a single frequency band separated in time during signal transmission to and from the base station; Bluetooth (a term derived from the Danish king Harald Blåtand); GSM (Global System for Mobile Communications); LTE (Long Term Evolution); Wi-Fi (Wireless Fidelity); WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

METODA BADAŃ

Przegląd piśmiennictwa specjalistycznego wykazał, że rozwój najpopularniejszych technologii elektromagnetycznych powodujących emisję radiofal do środowiska pracy i życia dotyczy ich wykorzystywania w radiokomunikacji i udostępniania kolejnych pasm częstotliwości do radiokomunikacji mobilnej (tj. poszerzania pasma częstotliwości pola-EM oddziałującego na pracujących i ludność) oraz ewolucji sposobu wykorzystania poszczególnych pasm. Analiza warunków koegzystencji ludzi z elektromagnetyczną infrastrukturą mobilnych sieci radiokomunikacyjnych i zależności tych warunków od rozwoju wykorzystywanych w nich technologii powinna z tego powodu obejmować rozpoznanie i analizę parametrów amplitudowo-częstotliwościowych pola-EM z pasma częstotliwości ok. 700–5800 MHz, które wykorzystywane jest przez systemy mobilne GSM, LTE, Wi-Fi oraz testowane w ostatnim czasie sieci nowej generacji (tab. 1). Rozpatrywane mikrośrodowiska znajdują się wewnątrz budynków lub pojazdów. Wobec wyników wcześniejszych badań, w takim przypadku można pominąć ocenę radiofal emitowanych przez naziemne stacje RTV (*Gryz* i in. 2022a).

Poziom narażenia na pole-EM jest na potrzeby oceny zagrożeń elektromagnetycznych charakteryzowany wartościami natężenia pola elektrycznego, E (w woltach na metr, V/m), (*Bieńkowski* i in. 2016; *Korniewicz* i in. 2001). W rozpatrywanym zakresie częstotliwości pola-EM wykorzystywanego w radiokomunikacji mobilnej dopuszczalne jest pominięcie oceny natężenia pola magnetycznego (*Bieńkowski* i in. 2017). Do analizy zależności warunków koegzystencji pracujących z elektromagnetyczną infrastrukturą sieci radiokomunikacyjnych od rozwoju tej infrastruktury kluczowe jest rozpoznanie, z jakich pasm częstotliwości pochodzą składowe widma amplitudowo-częstotliwościowego narażenia w rozpatrywanych mikrośrodowiskach (ponieważ poszczególne pasma częstotliwości pola-EM przeznaczono do różnego typu użytkowania, dane te pozwalają również na określenie dostępności i skali użytkowania poszczególnych usług w analizowanym mikrośrodowisku). W tym celu w ramach wizyt studialnych przeprowadzono pomiary z wykorzystaniem przenośnych, selektywnych częstotliwościowo rejestratorów wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego. Wąskie pasma częstotliwości pola-EM mierzonego przez

METHOD

A search through the literature has shown that the development of the most popular electromagnetic technologies causing the emission of radio waves into the work and living environment are associated with their use in radio communication and the allocation of more frequency bands for mobile communication (i.e. expanding the frequency band of the EMF affecting workers and the population) and with evolution in the way that particular bands are used. The analysis of the conditions of people coexisting with the infrastructure of electromagnetic mobile communication networks, and the dependence of these conditions on the development of the technologies used in them, should therefore include the recognition and analysis of the amplitude-frequency parameters of the EMF from the frequency band of approximately 700–5800 MHz, which is used by GSM, LTE, Wi-Fi mobile systems and the recently tested new generation networks (Table 1). The considered microenvironments are inside buildings or vehicles. Based on the results of previous research, in such a case the assessment of radio waves emitted by terrestrial RTV stations can be omitted (*Gryz* et al. 2022a).

For the purposes of assessing electromagnetic hazards, the level of exposure to EMF is characterised by the electric field strength values, E (in volts per metre, V/m) (*Bieńkowski* et al. 2016; *Korniewicz* et al. 2001). It is possible to omit the assessment of the magnetic field strength in the considered EMF frequency range used in mobile radio communication (*Bieńkowski* et al. 2017). In order to analyse the dependence of the conditions of people coexisting with the infrastructure of electromagnetic mobile communication networks on the development of this infrastructure, it is crucial to recognise from which frequency bands the components of the amplitude-frequency spectrum of exposure in the considered microenvironments come from (since particular EMF frequency bands are allocated for different types of use, this type of data also allows the availability and scale of use of particular services in the analysed microenvironment to be recognised). For this purpose, a series of measurements were carried out using portable, frequency-selective recorders of the RMS value (root mean square) of electric field strength. Narrow frequency bands of EMF measured by such recorders correspond to the bands used by particular

takie rejestratory odpowiadają pasmom wykorzystywanym przez poszczególne rodzaje sieci radiokomunikacyjnych (jak podano w tabeli 1) i pozwalają na rozpoznanie składowych narażenia i jego źródeł. W każdym z pasm zarejestrowano serie zsynchronizowanych czasowo próbek wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego z próbkowaniem co 4–6 sekund. Czułość rejestratorów w wykorzystywanych pasmach częstotliwości wynosi 0,02 V/m (w paśmie: 700–3000 MHz) lub 0,03 V/m (w paśmie: 3000–6000 MHz), a zakres pomiarowy do 6 V/m. Wzorcowanie rejestratorów przeprowadzono w laboratorium wzorcującym Tech-Safe-Bio/CIOP-PIB (certyfikat akredytacji nr AP061 udzielonej przez Polskie Centrum Akredytacji) – w sinusoidalnym wzorcowym polu-EM wytworzonym wewnątrz komory GTEM 750, kontrolowanym za pomocą kalibrowanej sondy pola-E.

Wykonano kilkudziesięciominutowe sesje pomiarowe w wybranych mikrośrodowiskach. Podczas pojedynczej sesji pomiarowej ochotnik wykonywał pomiary podczas spaceru po dostępnej dla pracowników i ludności przestrzeni centrum handlowego bądź podróżował pociągiem osobowym lub pojazdem samochodowym. Rejestrator pola-EM był unieruchomiony w odpowiednio przygotowanym plecaku, noszonym przez ochotnika wykonującego pomiary lub ustawionym na siedzeniu w pociągu lub pojeździe. Podczas pomiarów ochotnik nie używał osobistych urządzeń elektronicznych, takich jak telefon komórkowy czy tablet. W związku z tym zarejestrowane w pasmach UL wyniki pomiarów pochodzą jedynie od skutków aktywności innych osób przebywających w poszczególnych mikrośrodowiskach.

Przeprowadzone badania nie obejmowały oceny narażenia w miejscach dostępnych jedynie dla pracowników ani narażenia od źródeł radiofal znacznie wolniej ewoluujących technologii, takich jak radiotelefony służbowe czy czytniki RFID systemów zdalnego monitoringu oznakowanych obiektów i osób (*Zradziński* i in. 2022a; 2022b).

Po zakończeniu każdej sesji pomiarowej wyniki z pamięci rejestratora transferowano w formacie Excel do komputera do dalszej analizy statystycznej. Wyniki pomiarów pola-EM zarejestrowane w każdym paśmie częstotliwości scharakteryzowano parametrami statystycznymi: mediana (Med), 25. centyl (Q1), 75. centyl (Q3), 5. centyl (C5) i 95. centyl (C95). Nie analizowano wartości

types of mobile communication networks (as given in Table 1) and allow the identification of exposure components and their sources. In each band, a series of time-synchronised samples of the RMS electric field strength were recorded with a sampling of every 4–6 seconds. The sensitivity of the recorders in the frequency bands used is 0.02 V/m (in the band: 700–3000 MHz) or 0.03 V/m (in the band: 3000–6000 MHz), and the measurement range is up to 6 V/m. The calibration of the recorders was carried out in the Tech-Safe-Bio/CIOP-PIB calibration laboratory (accreditation certificate No AP061 given by the Polish Centre for Accreditation) – in a reference EMF generated inside the GTEM 750 chamber, controlled by a calibrated E-field probe.

Measurement sessions lasting at least 60 minutes were performed in selected microenvironments. During a single measurement session, the volunteer took measurements while walking around the shopping centre space available to workers and customers, or travelled by passenger train or car. The EMF recorder was located in a suitably prepared backpack, carried by the volunteer taking the measurements, or was placed on a seat in a train or car. While capturing the measurements, the volunteer did not use personal electronic devices, such as a mobile phone or tablet. Therefore, the measurement results recorded in the UL bands come only from the effects of the activity of other people present in the particular microenvironments.

The conducted research did not include an assessment of exposure in places accessible only to workers or exposure from radio wave sources from much more slowly evolving technologies, such as professional radiophones or RFID readers of remote monitoring systems of marked objects and people (*Zradziński* et al. 2022a; 2022b).

After each measurement session, the results from the recorder's memory were transferred in Excel format to a computer for further statistical analysis. The EMF measurement results recorded in each frequency band were characterised by statistical parameters: median (Med), 25th percentile (Q1), 75th percentile (Q3), 5th percentile (C5) and 95th percentile (C95). Minimum and maximum values were not analysed because this type of measurement usually results from the limited sensitivity of the recorder or reflects the susceptibility of the EMF recorder readings to a rapid change in its position (*Gryz* et al. 2021a; 2022a).

minimalnych i maksymalnych, ponieważ w tego typu pomiarach wynikają one przeważnie albo z ograniczonej czułości rejestratora, albo odzwierciedlają wrażliwość wskazań miernika pola-EM na szybką zmianę jego położenia (*Gryz* i in. 2021a; 2022a).

Analiza wyników pomiarów obejmowała następujące etapy:

(i) wstępną ocenę, w których pasmach częstotliwości rozpoznano pole-EM w poszczególnych sesjach pomiarowych – na podstawie oceny rozkładu zarejestrowanych wyników pomiarów; w dalszej analizie pominięto pasma częstotliwości, w których spełniona jest zależność: RW < 0,01, gdzie: RW = 2 × (Q3 − Q1)/(Q1 + Q3) – traktując takie wyniki jako szum pomiarowy wynikający z ograniczonej czułości rejestratora,

(ii) wyniki pomiarów z indywidualnych pasm częstotliwości, w których RW > 0,01, poddano dalszej analizie na podstawie wartości 75. centyla (Q3) obliczonego dla każdego pasma – wartości tego parametru zostały unormowane (NQ3) w odniesieniu do wartości 75. centyla wyznaczonej dla dominującej składowej w poszczególnych sesjach pomiarowych (DQ3),

(iii) na podstawie wyników pomiarów z indywidualnych pasm częstotliwości, w których RW > 0,01, obliczono również wartości skuteczne (czyli parametr energetyczny, zdefiniowany jako pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów wartości skutecznych zmierzonych w poszczególnych pasmach) narażenia łącznego w analizowanym mikrośrodowisku, wynikającego z następujących rodzajów emisji: (a) sygnały UL, (b) sygnały DL, (c) sygnały HS (komunikacji z lokalnymi hotspotami); obliczone wartości skuteczne (UL, DL i HS) scharakteryzowano wspomnianymi parametrami statystycznymi, a następnie unormowano je w odniesieniu do wartości wyznaczonej dla dominującej składowej (DQ3),

(iv) zmienność poziomu narażenia podczas poszczególnych sesji pomiarowych w poszczególnych pasmach częstotliwości oceniono na podstawie wartości współczynnika RT = C95/Med (mniejsza wartość RT wskazuje na mniejsze zróżnicowanie poziomu narażenia w czasie, co oznacza również jego większą wartość średnią przy danej wartości Q3).

The analysis of the measurement results included the following stages:

(i) a preliminary assessment to recognise the frequency bands of the EMF in particular measurement sessions – based on an analysis of the distribution of the recorded measurement results; in a further assessment, frequency bands were omitted in which the relationship was met: RW < 0.01, where: RW = 2 × (Q3 − Q1)/(Q1 + Q3) – treating such results as measurement noise resulting from the limited sensitivity of the recorder,

(ii) measurement results from particular frequency bands in which RW > 0.01 were further analysed based on the value of the 75th percentile (Q3) calculated for each band – the values of this parameter were normalised (NQ3) in relation to the value of the 75th percentile determined for the dominant component in particular measurement sessions (DQ3),

(iii) based on the measurement results from particular frequency bands in which RW > 0.01, the RMS values (i.e. the energy parameter, defined as the root-mean-square of the sum of the squares of the RMS values measured in particular bands) of the total exposure in the analysed microenvironment, resulting from the following types of emissions: (a) UL signals, (b) DL signals, (c) HS signals (communication with local hotspots); the calculated RMS values (UL, DL and HS) were characterised by the mentioned statistical parameters and then normalised in relation to the value determined for the dominant component (DQ3),

(iv) the variability of the exposure level during particular measurement sessions in particular frequency bands was assessed by values of the factor RT = C95/Med (a smaller RT value indicates a smaller variability in the exposure level over time, which also means its higher average value at a particular Q3 value).

WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI

Na podstawie wyników badań zrealizowanych podczas wizyt studialnych przeprowadzono ocenę charakterystyki narażenia na radiofale z poszczególnych pasm częstotliwości (wykorzystywanych przez sieci mobilnej radiokomunikacji) dla typowych mikrośrodowisk: (i) pociągów osobowych, (ii) centrów handlowych i (iii) pojazdów samochodowych. W kontekście rozwoju takich technologii oraz ewolucji sposobu ich użytkowania i warunków oddziaływania elektromagnetycznego na pracowników i ludność, przeprowadzono porównanie udziału radiofal z poszczególnych pasm częstotliwości zarejestrowanych w poszczególnych mikrośrodowiskach w 2023 oraz w 2018 r. (na podstawie odpowiednich danych archiwalnych), (*Gryz, Karpowicz* 2019; *Gryz* i in. 2022b; *Karpowicz* i in. 2018a).

Rozpoznano obecność dominujących składowych pochodzących od systemów telefonii mobilnej (pasma: GSM 900, LTE 800, LTE 1800, LTE 2100, LTE 2600), o wartościach natężenia pola elektrycznego w poszczególnych pasmach nieprzekraczających poziomu 1 V/m (ryc. 1). Jest to typowa dla środowiska miejskiego złożona charakterystyka narażenia na radiofale, obserwowana w badaniach przeprowadzonych w różnych państwach (*Boussad* i in. 2022). W widmie promieniowania nie zaobserwowano składowych o częstotliwościach zarezerwowanych dla budowanych stopniowo sieci nowej generacji, korzystających z tzw. pasma niskiego (694–790 MHz – 5G700) i pasma średniego (3400–3800 MHz – 5G3600) (*Bieńkowski* 2023b; Ministerstwo Cyfryzacji 2018).

Przeprowadzone badania wykazały na przestrzeni ostatnich 5 lat (2018-2023) istotnie zróżnicowane kierunki zmian warunków narażenia na radiofale w analizowanych typach mikrośrodowisk, ale przy nieznacznych zmianach poziomu całkowitego narażenia w środowisku pracy dostępnym dla pracowników i ludności. Zaobserwowane zmiany są powiązane z upowszechnieniem mobilnego dostępu do szybkiego przesyłania danych i przyspieszenia ich transmisji z urządzeń osobistych, najczęściej terminali, takich jak smartfony lub tablety.

Wyniki pomiarów w centrach handlowych zestawiono w tabeli 2. Zaobserwowano tam dominujący udział składowych DL narażenia (emisji ze stacji bazowych) oraz poszerzenie jego pasma częstotliwości (wskutek rozpowszechnienia

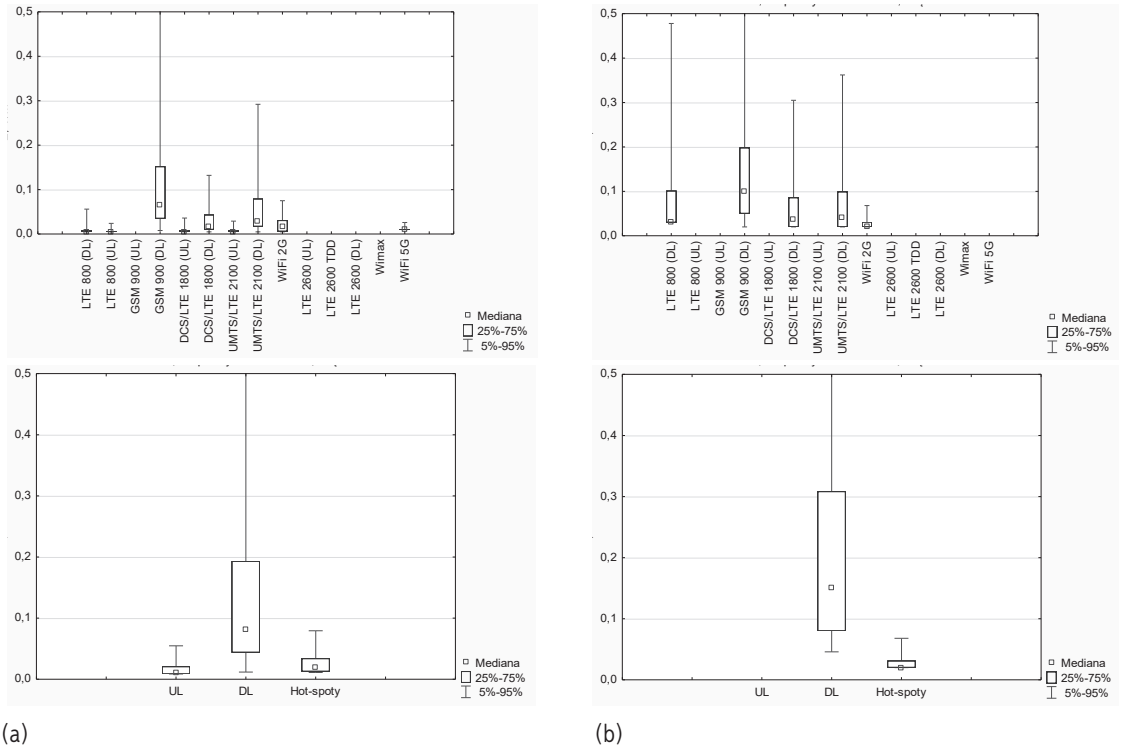
RESULTS AND CONCLUSIONS

Based on the results of research carried out during study visits, the characteristics of exposure to radio waves from particular frequency bands (used by the mobile radio communication networks) was assessed for typical microenvironments: (i) passenger trains, (ii) shopping centres and (iii) passenger cars. In the context of the development of such technologies and the evolution of their use, as well as the conditions of electromagnetic impact on workers and the public, a comparison was made of the contribution of radio waves from particular frequency bands recorded in particular microenvironments in 2023 and in 2018 (based on relevant archive data) (*Gryz, Karpowicz* 2019; *Gryz* et al. 2022b; *Karpowicz* et al. 2018a).

The assessment revealed the presence of dominant components from public mobile communication systems (bands: GSM 900, LTE 800, LTE 1800, LTE 2100, LTE 2600), with electric field strength values in particular bands not exceeding 1 V/m (Fig. 1). This is a complex characteristic of radiofrequency exposure typical for urban environments, observed in studies conducted in various countries (*Boussad* et al. 2022). In the radiation spectrum, no components with frequencies allocated for the gradually built new generation networks using the low band (694–790 MHz – 5G700) and mid band (3400–3800 MHz – 5G3600) were observed (*Bieńkowski* 2023b; Ministerstwo Cyfryzacji 2018).

The research showed significantly different directions of changes, over the last five years (2018-2023), not only in the conditions of exposure to radio waves in the analysed types of microenvironments, but also revealing slight changes in the level of total exposure in the work environment available to workers and the public. The observed changes are related to the spread of mobile access to fast data transfer and increased speeds of transmission from personal devices, most often personal devices such as smartphones or tablets.

The results of the measurements in shopping centres are summarised in Table 2. In this environment there was observed a dominant downlink-component of exposure (emissions from base stations) and a broadening of the frequency band (due to the spread of LTE subscription services using the 2100 and 2600 MHz bands) along with reduced contribution from uplink-components (emissions from



Rycina 1. Ewolucja charakterystyk narażenia na pole-EM emitowane przez urządzenia sieci radiokomunikacyjnych zaobserwowana w typowej galerii handlowej: a) wyniki pomiarów z 2018 r.; b) wyniki pomiarów z 2023 r.; zilustrowano pasma częstotliwości, w których współczynnik RW > 0,01

Figure 1. *Evolution of the characteristics of exposure to the EMF emitted by mobile communication network devices observed in a typical shopping centre: a) measurement results from 2018; b) measurement results from 2023; frequency bands with RW > 0.01 are showed*

abonamentowych usług LTE korzystających z pasm: 2100 i 2600 MHz) przy obniżeniu udziału składowych UL (emisji z terminali) i marginalizacji narażenia związanego z komunikacją z lokalnymi hotspotami sieci nieabonamentowych (Wi-Fi 2GHz i Wi-Fi 5GHz). Te obserwacje mogą wiązać się zarówno z przewagą pobierania treści z zasobów sieci (np. Internetu) w porównaniu z wysyłaniem własnych danych, jak również z przyspieszeniem komunikacji z terminali do BTS (ponieważ krótsze sekwencje emisji radiofal są słabiej rejestrowane przez wykorzystywane urządzenia pomiarowe). Taki problem pomiarowy można ograniczyć wykorzystując w pomiarach szybki miernik szerokopasmowy lub omawianego typu rejestrator pracujący z częstszym próbkowaniem, ale przy znacznie mniejszej ilości mierzonych pasm częstotliwości).

Dla odmiany w pociągach osobowych zaobserwowano dominujący udział składowych UL narażenia oraz poszerzenie pasma jego częstotliwości nawet w miejscach wyposażonych w lokalne hotspoty – wyniki pomiarów w pociągach osobowych zestawiono w tabeli 3.

personal devices) and from components related to local hotspots of non-subscription networks (Wi-Fi 2GHz and Wi-Fi 5GHz). That observations may be associated with both the domination of downloading content from network resources (e.g. the internet) comparing to a person sending their own data, as well as the increased speeds of transmission from personal devices to the BTS (because shorter radio wave emission sequences are less well captured by the measuring devices used). Such a measurement problem can be reduced by using a fast broadband meter or the discussed type of frequency-selective recorder working with faster sampling, but with a significantly smaller number of measured frequency bands.

In contrast, in passenger trains, a dominant contribution from uplink-components of exposure were observed, along with a broadening of the frequency band, even in places equipped with local hotspots – the measurement results in passenger trains are summarised in Table 3.

Tabela 2. Typowy względny udział składowych pola-EM zarejestrowanego w centrach handlowych
Table 2. *Typical relative contribution of EMF components recorded in shopping centres*

Pasma częstotliwości *Frequency bands*	2018		2023	
	NQ3	RT	NQ3	RT
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne / *Subscription mobile communication networks*				
LTE800				
UL	0,04	4,8	nd.	nd.
DL	0,05	11	0,52	16
GSM900				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	**1,0**	8,2	**1,0**	6,4
LTE1800				
UL	0,06	7,0	nd.	nd.
DL	0,28	7,7	0,44	8,2
LTE2100				
UL	0,06	5,6	nd.	nd.
DL	0,52	10	0,50	9,1
LTE2600				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
TDD	nd.	nd.	nd.	nd.
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne nowej generacji / *New generation subscription mobile communication networks*				
5G700	nd.	nd.	nd.	nd.
5G3600	nd.	nd.	nd.	nd.
Lokalne hotspoty nieabonamentowe / *Local non-subscription hotspots*				
WIFI2GHz	0,20	4,7	0,16	3,4
WIMAX	nd.	nd.	nd.	nd.
WIFI5GHz	0,07	2,6	nd.	nd.

Uwagi: Oznaczenia pasm częstotliwości jak w tab. 1; NQ3 – 75. centyl wyników pomiaru w sesji pomiarowej w danym paśmie częstotliwości, odniesiony do wartości DQ3 w paśmie częstotliwości, które powoduje dominujący udział w narażeniu na pole-EM; RT – współczynnik obliczony wg zależności: RT = C95/Med, gdzie C95 – 95. centyl, Med – mediana (mniejsze wartości współczynnika RT odpowiadają mniejszej zmienności w czasie poziomu narażenia zarejestrowanego w danym paśmie częstotliwości); nd. – pasmo, w którym wyniki pomiarów spełniały zależność: RW < 0,01, gdzie RW = 2 × (Q3 – Q1)/(Q1 + Q3).

Notes: Frequency band designations as in Table 1; NQ3 – 75th percentile of measurement results in a measurement session in a given frequency band, related to the DQ3 value in the frequency band that causes the dominant contribution to EMF exposure; RT – coefficient calculated according to the relationship: RT = C95/Med, where C95 – 95th percentile, Med – median (lower values of the RT coefficient correspond to lower variability in time of the exposure level recorded in a given frequency band); nd. – band in which the measurement results met the relationship: RW < 0.01, where RW = 2 × (Q3 – Q1)/(Q1 + Q3).

W pojazdach samochodowych również zaobserwowano poszerzenie pasma częstotliwości narażenia pochodzącego z zewnętrznych źródeł radiofal (nowe składowe DL z pasm 800 i 2600 MHz), (tab. 4).

W tabeli 5 podsumowano wyniki badań odnoszące się do poszczególnych typów emisji: (a) UL, (b) DL i (c) HS, charakteryzując zróżnicowane kierunki zmian parametrów narażenia w poszczególnych typach mikrośrodowisk. We wszystkich typach ocenianych mikrośrodowisk zaobserwowano zmniejszenie fluktuacji w czasie poziomu narażenia na radiofale (tj. zmniejszenie wartości wskaźnika RT). Podczas podróży pojazdami samochodowymi może to być spowodowane zwiększoną ilością stacji bazowych w otoczeniu szlaków komunikacyjnych, w pociągach osobowych i centrach handlowych raczej zmianami parametrów użytkowania terminali.

In passengers cars, exposure to external radio waves (downlink components) was also broadened in the frequency band (in the 800 and 2600 MHz bands) (Table 4).

Table 5 summarises the obtained research results relating to particular types of emissions: (a) UL, (b) DL and (c) HS, characterising the various directions of changes in exposure parameters in particular types of microenvironments. In all types of microenvironments assessed, a reduction in the exposure fluctuation over time (i.e. a RT values lowering) was observed. When traveling by car, this may be due to the increased number of BTS near to communication routes, while in passenger trains and shopping centres it is rather because of changes in the parameters of using the terminals.

Tabela 3. Typowy względny udział składowych pola-EM zarejestrowanego w pociągach osobowych
Table 3. *Typical relative contribution of EMF components recorded in passenger trains*

Pasma częstotliwości *Frequency bands*	2018		2023	
	NQ3	RT	NQ3	RT
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne/ *Subscription mobile communication networks*				
LTE800				
UL	0,11	3,9	0,80	11
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
GSM900				
UL	**1,0**	23	**1,0**	7,4
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
LTE1800				
UL	0,11	22	0,19	12
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
LTE2100				
UL	0,11	7,5	0,10	7,8
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
LTE2600				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
TDD	nd.	nd.	nd.	nd.
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne nowej generacji/ *New generation subscription mobile communication networks*				
5G700	nd.	nd.	nd.	nd.
5G3600	nd.	nd.	nd.	nd.
Lokalne hotspoty nieabonamentowe/ *Local non-subscription hotspots*				
WIFI2GHz	0,13	7,4	0,5	1,8
WIMAX	nd.	nd.	nd.	nd.
WIFI5GHz	nd.	nd.	0,6	6,4
Uwagi: Oznaczenia jak w tab. 1 i 2. *Notes: Designations as in Tables 1 and 2.*				

Tabela 4. Typowy względny udział składowych pola-EM zarejestrowanego w pojazdach samochodowych
Table 4. *Typical relative contribution of EMF components recorded in passenger cars*

Pasma częstotliwości *Frequency bands*	2018		2023	
	NQ3	RT	NQ3	RT
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne/ *Subscription mobile communication networks*				
LTE800				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	0,48	7,1	0,59	6,5
GSM900				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	**1,0**	6,4	**1,0**	5,8
LTE1800				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	0,76	7,2	0,81	5,4
LTE2100				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	0,54	9,9	0,73	5,2
LTE2600				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	0,10	4,1	0,49	7,1
TDD	nd.	nd.	nd.	nd.
Abonamentowe mobilne sieci radiokomunikacyjne nowej generacji/ *New generation subscription mobile communication networks*				
5G700	nd.	nd.	nd.	nd.
5G3600	nd.	nd.	nd.	nd.
Lokalne hotspoty nieabonamentowe/ *Local non-subscription hotspots*				
WIFI2GHz	nd.	nd.	nd.	nd.
WIMAX	nd.	nd.	nd.	nd.
WIFI5GHz	nd.	nd.	nd.	nd.
Uwagi: Oznaczenia jak w tab. 1 i 2. *Notes: Designations as in Tables 1 and 2.*				

Tabela 5. Typowy względny udział składowych pola-EM zarejestrowanego w poszczególnych rodzajach pasm częstotliwości łącznie: UL (GSM 900, LTE 800, 1800, 2100, 2600); DL (GSM 900, LTE 800, 1800, 2100, 2600); HS (WIFI2GHz, WIMAX, WIFI5GHz)
Table 5. *Typical relative contribution of EMF components recorded in particular frequency bands, jointly: UL (GSM 900, LTE 800, 1800, 2100, 2600); DL (GSM 900, LTE 800, 1800, 2100, 2600); HS (WIFI2GHz, WIMAX, WIFI5GHz)*

Pasma częstotliwości *Frequency bands*	2018		2023	
	NQ3	RT	NQ3	RT
Centrum handlowe/ *Shopping centre*				
UL	0,14	5,1	nd.	nd.
DL	1,3	8,1	1,6	6,9
HS	0,22	4,0	0,16	3,4
Pociąg osobowy / *Passenger train*				
UL	1,3	15	1,8	4,6
DL	nd.	nd.	nd.	nd.
HS	nd.	nd.	0,81	3,1
Samochód osobowy / *Passenger car*				
UL	nd.	nd.	nd.	nd.
DL	1,7	5,6	1,9	5,0
HS	nd.	nd.	nd.	nd.
Uwagi: Oznaczenia jak w tab. 1 i 2. *Notes: Designations as in Tables 1 and 2.*				

DYSKUSJA

Rozwojowi technologii wykorzystujących emisje elektromagnetyczne powinno towarzyszyć monitorowanie ich odziaływania na środowisko: przede wszystkim ze względu na ocenę skutków elektromagnetycznego oddziaływania na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi (w ramach badań dotyczących zdrowia publicznego lub inżynierii środowiska), ale także oddziaływania na urządzenia elektroniczne (w ramach badań dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej, ang. *Electromagnetic Compatibility*, EMC).

Użytkowanie systemów radiokomunikacyjnych powoduje ciągłą ekspozycję na radiofale emitowane przez anteny nadawcze o charakterystyce częstotliwościowej, przestrzennej i mocy dostosowanych do wymagań technicznych poszczególnych systemów radiokomunikacyjnych. Również lokalizacja anten nadawczych jest dostosowana do względów użytkowo-technicznych, w tym do warunków propagacji fali elektromagnetycznej, a także do zapewnienia niezakłócanego i odpowiednio wydajnego dostępu do infrastruktury pośredniczącej w transferze danych dla użytkowników sieci mobilnych (obecnie przeważnie dostęp do zasobów internetowych).

Miejsca przebywania większych grup ludzi wymuszają większe skumulowanie anten nadawczych, a w konsekwencji najbardziej złożone widmo częstotliwościowe radiofal i zwiększony poziom ekspozycji z uwagi na większą liczbę przebywających tam użytkowników sieci radiokomunikacyjnych. Do miejsc takich można zaliczyć

DISCUSSION

The development of technologies using electromagnetic emissions should be accompanied by monitoring their impact on the environment: primarily due to an assessment of the effects of the electromagnetic impact on human safety and health (as part of research on public health or environmental engineering), but also the impact on electronic devices (as part of the research on Electromagnetic Compatibility, EMC).

The use of mobile communication systems results in continuous exposure to radio waves emitted by transmitting antennas with frequency, spatial characteristics and power adapted to the technical requirements of particular radio communication systems. The location of the transmitting antennas is also adapted to operational and technical considerations, including the conditions of electromagnetic wave propagation, as well as to ensure uninterrupted and sufficiently effective access to infrastructure intermediating in data transfer for mobile network users (currently, mainly access to internet resources).

Places where larger groups of people stay require a greater concentration of transmitting antennas, and consequently the most complex radio frequency spectrum and an increased level of exposure due to the larger number of users of mobile communication networks there. Such places include large shopping centres, visited by numerous customers using mobile communication systems,

duże centra handlowe, odwiedzane przez licznych klientów, korzystających przy tym z systemów radiokomunikacyjnych, ale także sklepy posiadające różnorodne wyposażenie z funkcjami bezprzewodowej transmisji danych (np. terminale płatnicze, bankomaty, systemy wizualizacji zasobów danej placówki handlowej itd.).

Analiza wyników badań wskazuje, że w galeriach handlowych w 2018 r. występowały wszystkie składowe ekspozycji na radiofale (UL, DL, HS), natomiast w 2023 r. nie stwierdzono istotnego udziału w ekspozycji składowej UL. Źródłami najsilniejszej ekspozycji są nadajniki BTS sieci telefonii mobilnej (pasmo DL). Wyniki badań wykonanych w centrach handlowych wskazują, że upowszechnienie urządzeń i usług abonamentowych LTE oraz relatywnie niskie koszty korzystania z nich sprawiają zmniejszenie zapotrzebowania na wymianę danych za pomocą lokalnych nieabonamentowych hotspotów Wi-Fi (pomimo ich zwiększonej dostępności w takich placówkach) w porównaniu z komunikacją za pośrednictwem sieci telefonii mobilnej. Natomiast podkreślenia wymaga, że korzystanie z hotspotów Wi-Fi z reguły skutkuje zdecydowanym obniżeniem poziomu narażenia ludzi na radiofale, ponieważ system taki przeznaczony jest do łączności krótkiego zasięgu i wykorzystuje komunikację za pośrednictwem słabszych radiofal.

W pociągach osobowych, zarówno w 2018, jak i w 2023 r., nie stwierdzono istotnego udziału składowej DL. Może to wynikać z niedostatecznej dostępności wzdłuż kolejowych szlaków komunikacyjnych sygnału publicznej telefonii mobilnej. Drugim powodem zaobserwowanej charakterystyki narażenia w pociągach jest tłumienie zewnętrznego sygnału radiofalowego przez elementy konstrukcyjne pojazdu. Podobny efekt zwiększonego tłumienia sygnału z zewnętrznych nadajników telefonii mobilnej stwierdzono np. w budynkach z oknami zapewniającymi izolację termiczną (*Koppel* i in. 2019). W takich warunkach do uzyskania połączenia terminala z siecią BTS konieczna jest zwiększona moc sygnału radiofalowego emitowanego przez terminal telefonii mobilnej (praca terminala z wymuszoną silniejszą emisją radiofal w paśmie UL). Alternatywnym rozwiązaniem jest korzystanie z wewnętrznych hotspotów Wi-Fi, których emisje zostały zarejestrowane podczas pomiarów w pociągach osobowych – o ile pociąg jest wyposażony w taką instalację i zapewnia ona dostateczną jakość komunikacji. Jak wspomniano, korzystanie z hotspotów powoduje słabsze narażenie

along with the use of various equipment in stores with wireless data transmission functions (e.g. payment terminals, ATMs, resource visualisation systems of a given retail outlet, etc.).

An analysis of the investigation results indicates that in shopping centres in 2018 all the components of exposure to radio waves (UL, DL, HS) were present, while in 2023 there was no significant contribution of the UL component in the exposure. The sources of the strongest exposure are BTS of mobile phones networks (DL band). The results of research carried out in shopping centres indicate that the growing use of LTE devices and subscription services, along with their relatively low cost, reduce the demand for data exchange using local non-subscription Wi-Fi hotspots (despite their increased availability in such facilities) compared to communication via the public mobile communication network. However, it should be emphasised that the use of Wi-Fi hotspots usually results in a significant reduction in the level of human electromagnetic exposure, because that system is intended for short-range communications and uses communication via weaker radio waves.

In passenger trains no significant contribution from the DL component was found in 2018 or in 2023. This may result from the insufficient availability of public mobile communication signals along railway communication routes. A second reason for the observed exposure characteristics in trains is the attenuation of the external RF signal by vehicle structural components. A similar effect of increased signal attenuation from external mobile communication transmitters was found, for example, in buildings with windows providing thermal insulation (*Koppel* et al. 2019). In such conditions, in order to connect the personal device to the BTS, it is necessary to increase the power of the radio wave signal emitted by the mobile communication personal device (the terminal operation forced the increased emission of radio waves in the UL band). An alternative solution is to use internal Wi-Fi hotspots, whose emissions were recorded during measurements in passenger trains – provided that the train is equipped with such an installation and it ensures sufficient quality of communication. As mentioned, the use of hotspots is associated with lower exposure compared to the use of subscription public mobile

w porównaniu z korzystaniem z abonamentowych sieci telefonii mobilnej (*Zradziński* i in. 2022a; 2022b).

Odmienne wyniki uzyskano w badaniach wykonanych w samochodach, w ekspozycji dominowały składowe z pasm DL z zewnętrznych źródeł radiofal (tj. sieci BTS zlokalizowanych w pobliżu szlaków komunikacyjnych). Zakładając, że kierujący pojazdem samochodowym postępuje zgodnie z wymaganiami prawa o ruchu drogowym (tzn. nie korzysta z osobistego terminala lub posługuje się instalacją typu „hand-free" wykorzystującą zewnętrzną antenę zamontowaną do karoserii pojazdu), można przyjąć, że narażenie na radiofale pochodzi od źródeł zewnętrznych – przydrożnych anten BTS emitujących promieniowanie z pasm DL.

Przeprowadzone badania nie obejmowały oceny narażenia na pole-EM bezpośrednio przy antenach nadajników sieci telefonii mobilnej, gdzie lokalnie występują warunki narażenia kontrolowanego (tzn. narażenia na tyle silnego, że zgodnie z wymaganiami prawa pracy wymagane jest zapewnienie ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi) i gdzie w świetle wyników badań dotyczących skutków narażenia na radiofale w środowisku pracy oraz wspomnianych wymagań prawa pracy powinny być podejmowane działania organizacyjne i techniczne prowadzące do ograniczania narażenia na radiofale oraz ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy i życia, o ile zachowane są warunki do zamierzonego użytkowania technologii elektromagnetycznych (*Bieńkowski* i in. 2020; *Zmyślony* i in. 2020).

Kluczowe wnioski praktyczne z omawianej serii badań:

- zaobserwowano zbliżone poziomy radiofal zarejestrowane w latach 2018 i 2023;
- zaobserwowano nieznaczne zmiany w widmie częstotliwości narażenia, skutkujące poszerzeniem pasma częstotliwości radiofal rejestrowanych w rozpatrywanych mikrośrodowiskach;
- ewolucja systemów radiokomunikacji mobilnej zmierzająca do przyspieszenie przesyłania informacji skutkuje skracaniem czasu trwania emisji radiofal, co oznacza, że wymagane jest stosowanie aparatury pomiarowej umożliwiającej poprawny pomiar krótkotrwałych narażeń, tzn. stosowanie odpowiednio szybko reagujących szerokopasmowych mierników wartości skutecznej albo mierników selektywnych

communication networks (*Zradziński* et al. 2022a; 2022b).

Different results were obtained in studies performed in cars: the dominant component in exposure was the DL band from external radio wave sources (i.e. the network of BTS located near communication routes). Assuming that the driver of a passenger car complies with road traffic law requirements (does not use a personal device or uses a "hand-free" installation using an external antenna mounted to the vehicle's body), it can be assumed that exposure to radio waves comes from external sources – along-road BTS antennas emitting radiation from the DL bands.

The conducted research did not include the assessment of exposure to EMF directly at the antennas of public mobile communication network transmitters, where locally controlled exposure conditions occur (i.e. exposure strong enough that, in accordance with labour law, it is required there to ensure protection against electromagnetic hazards) and where, in light of research results on the effects of exposure to radio waves in the work environment and the labour law requirements, organisational and technical actions should be taken to reduce exposure to radio waves and electromagnetic hazards in the work and living environment, provided that the conditions for the intended use of electromagnetic technologies are maintained (*Bieńkowski* et al. 2020; *Zmyślony* et al. 2020).

Practical key conclusions from the discussed series of studies:

- similar levels of radio waves were recorded in 2018 and 2023;
- slight changes in the exposure frequency spectrum were observed, resulting in a broadening of the radio frequency band recorded in the considered microenvironments;
- the evolution of mobile communication systems aimed at increasing speeds of information transfer results in shortening the duration of radio wave emission, which means that measurement equipment must be used that enables the correct measurement of short-term exposure, i.e. suitably fast-reacting broadband RMS meters or frequency-selective meters with faster sampling (which, in practice, means the simultaneous measurement of a smaller number of measurement bands indicating exposure sources, or measurements that do not distinguish between

częstotliwościowo przy częstszym próbkowaniu (co w praktyce oznacza albo równoczesny pomiar mniejszej liczby pasm pomiarowych identyfikujących źródła narażenia, albo pomiar nierozróżniający składowych, czyli źródeł narażenia, które należy w takim przypadku rozpoznać innym sposobem, np. na podstawie szczegółowego rozpoznania systemów radiokomunikacyjnych użytkowanych w danym mikrośrodowisku);
– zaobserwowane obniżenie poziomu składowych narażenia wynikających z emisji sygnałów UL może być powiązane ze zmniejszonym korzystaniem z przesyłania informacji z terminali do sieci BTS lub ze zmniejszoną czułością użytych rejestratorów na krótsze oddziaływanie radiofal (skrócone wskutek zwiększonej szybkości przesyłania informacji);
– przy zróżnicowanych kierunkach ewolucji charakterystyki narażenia na pole-EM systemów radiokomunikacyjnych, w analizowanych typach mikrośrodowisk konieczne jest stosowanie odmiennych środków ograniczających narażenie zatrudnionych tam pracowników: (1) w galeriach handlowych dominuje narażenie na radiofale emitowane z sieci BTS (sygnały DL) – obniżenie tego narażenia wymaga lokalizowania anten BTS (zewnętrznych lub wnętrzowych) w oddaleniu od miejsc długotrwałego przebywania pracowników (np. od stanowisk kasjerów), ponadto udostępnienie lokalnych hotspotów może obniżyć poziom narażenia dzięki korzystaniu z sieci urządzeń krótkiego zasięgu; (2) w pociągach osobowych dominuje narażenie wynikające z użytkowania terminali przez pasażerów i pracowników (sygnały UL) – obniżeniu tego narażenia sprzyja udostępnienie pasażerom lokalnych hotspotów dzięki korzystaniu z sieci urządzeń krótkiego zasięgu; (3) w pojazdach samochodowych dominuje narażenie na radiofale emitowane z sieci zewnętrznych BTS, których lokalizacja jest niezależna od użytkowników pojazdów samochodowych – obniżenie tego narażenia jest możliwe poprzez ekranowanie elektromagnetyczne kabiny kierowcy (powodujące równocześnie brak łączności terminala znajdującego się w takiej kabinie z zewnętrzną siecią BTS), systemowym środkiem ochronnym jest również uwzględnienie

the components, i.e. sources of exposure, which would require them to be recognised in another way, e.g. based on a detailed examination of mobile communication systems used in a given microenvironment);
– the observed reduction in the level of exposure components resulting from the emission of UL signals may be related to the reduced use in transmitting information from personal devices to the BTS or with the reduced sensitivity of the used recorders to shorter exposure to radio waves (shortened due to the increased speed of information transmission);
– given the different directions of evolution of the characteristics of exposure to the EMF of mobile communication systems, in the analysed types of microenvironments it is necessary to apply different measures reducing the exposure of workers there: (1) in shopping centres, exposure to radio waves emitted from the BTS (DL signals) predominates – reducing this exposure requires locating BTS antennas (external or indoor) away from places where workers are present for long periods (e.g. from cashiers' desks), in addition, providing local hotspots may reduce the level of exposure through the use of a short-range devices network; (2) in passenger trains, exposure results from the use of personal devices by passengers and workers (UL signals) – reducing this exposure is facilitated by making local hotspots available to passengers thanks to the use of a short-range devices network; (3) in passenger cars, exposure to radio waves emitted from external BTS dominates, the location of which is independent of the users of passenger cars – reducing this exposure is possible by electromagnetic shielding of the driver's cabin (though this would also cause any personal devices located in the cabin to lose communication with the external BTS), a systemic protective measure is also to include in the planning of BTS antennas also a configuration in which drivers' exposure to radio waves is lowered.

The data obtained correlates with the information provided on changes in telecommunications services from 2018 to 2022 in Poland (UKE 2022; 2023):

w planowaniu anten sieci BTS takiego ich skonfigurowania, przy którym narażenie kierowców na radiofale jest obniżane.

Uzyskane dane korelują z przytoczonymi informacjami o zmianach usług telekomunikacyjnych w okresie od 2018 do 2022 r. w Polsce (UKE 2022; 2023):

- przyrost liczby użytkowników mobilnego dostępu do Internetu z 7,7 mln do 8,8 mln,
- zwiększenie ilości danych przesłanych z wykorzystaniem sieci mobilnych z 2,8 mln TB do 7,2 mln TB,
- wydłużenie czasu połączeń głosowych o ok. 12%,
- zwiększenie liczby wysłanych wiadomości MMS (z 1,8 mld do 2,49 mld) przy zmniejszeniu liczby wysłanych wiadomości SMS (z 46,5 mld do 38,3 mld).

- increase in the number of users of mobile internet access from 7.7 million to 8.8 million,
- increase in the amount of data sent using mobile networks from 2.8 million TB to 7.2 million TB,
- extension of voice call duration by approximately 12%,
- increasing the number of MMS messages sent (from 1.8 billion to 2.49 billion) while reducing the number of SMS messages sent (from 46.5 billion to 38.3 billion).

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników wizyt studialnych, analizy dokumentacji technicznej urządzeń oraz przeglądu piśmiennictwa specjalistycznego opracowano diagnozę warunków koegzystencji wybranych grup pracujących z infrastrukturą technologii elektromagnetycznych powodujących emisję radiofal w środowisku pracy i życia.

Do szczegółowego rozpoznania i analizy parametrów pola-EM w środowisku pracy i życia oraz oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z warunkami oddziaływania elektromagnetycznego na pracowników i ludność wybrano warunki koegzystencji ludzi z taką infrastrukturą w typowych mikrośrodowiskach (w pociągach osobowych, centrach handlowych i pojazdach samochodowych), uwzględniając również skutki ewolucji parametrów technicznych i sposobu użytkowania mobilnych technologii i usług radiokomunikacyjnych.

Przeprowadzone badania wykazały w ciągu ostatnich 5 lat (2018-2023) istotnie zróżnicowane kierunki zmian warunków narażenia na radiofale w analizowanych typach mikrośrodowisk: (1) we wszystkich mikrośrodowiskach stwierdzono zmniejszenie fluktuacji narażenia w czasie przy nieznacznych zmianach poziomu całkowitego narażenia w środowisku pracy dostępnym dla pracowników i ludności; (2) w galeriach handlowych obniżenie składowych narażenia z lokalnych hotspotów i poszerzenie pasma częstotliwości dominujących sygnałów DL; (3) w pociągach osobowych podwyższenie składowych narażenia z lokalnych

CONCLUSION

Based on the results of study visits, analyses of technical documentation of devices and a literature review, a diagnosis of conditions of people coexisting with the infrastructure of electromagnetic mobile communication technologies emitting radio waves in the work and living environment was developed.

The conditions of people coexisting with such infrastructure in typical microenvironments (in passenger trains, shopping centres and passenger cars) were selected for detailed identification and analysis of EMF parameters in the work and living environment and an assessment of the electromagnetic hazards related to the conditions of the electromagnetic impact on workers and the public, taking into account the evolution of technical parameters and changes in the use of mobile communications technologies and services.

The conducted research revealed significantly different trends, over the last five years (2018-2023), in the structure of exposure to radio waves in the analysed types of microenvironments: (1) in all the microenvironments, a reduction in exposure fluctuations over time was found with slight changes in the level of total exposure in the analysed environments used by workers and the public; (2) in shopping centres, reducing exposure components from local hotspots and broadening the frequency band of dominant DL signals; (3) in passenger trains, increasing exposure components from local hotspots and broadening the frequency band of dominant UL signals; (4) in passenger cars, broadening the

hotspotów i poszerzenie pasma częstotliwości dominujących sygnałów UL; (4) w pojazdach samochodowych poszerzenie pasma częstotliwości dominujących sygnałów DL. Zaobserwowane zmiany wiążą się z upowszechnieniem mobilnego dostępu do szybkiego przesyłania danych i przyspieszenia ich transmisji z urządzeń osobistych, najczęściej terminali, takich jak smartfony lub tablety.

Przy zróżnicowanych kierunkach ewolucji charakterystyki narażenia na pole-EM systemów radiokomunikacyjnych, w analizowanych typach mikrośrodowisk konieczne jest stosowanie odmiennych środków ograniczających narażenie zatrudnionych tam pracowników, a także różnych metod rozpoznania i oceny parametrów takiego narażenia.

frequency band of dominant DL signals. The observed changes are related to the spread of mobile access to fast data transfer and increased speeds of transmission from personal devices, most often personal devices such as smartphones or tablets.

Due to the different directions of evolution of the characteristics of exposure to the EMF of mobile communication systems, in the analysed types of microenvironments it is necessary to use different measures to reduce workers' exposure, along with different methods for identifying and assessing the parameters of such exposure.

PIŚMIENNICTWO / REFERENCES

Bieńkowski P., Karpowicz J., Kieliszek J. (2016). Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy [A review of the effects of exposure to a time-varying electromagnetic field and the metrological properties of measurement devices that have a significant influence when evaluating exposure in the work environment]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(90), 41–74.

Bieńkowski P., Aniołczyk H., Karpowicz J. i in. (2017). Narażenie na pole elektromagnetyczne w przestrzeni pracy podczas użytkowania urządzeń nadawczych systemów radiokomunikacyjnych. Metoda pomiaru pola elektromagnetycznego in situ – wymagania szczegółowe [Exposure to the electromagnetic field in the work space during the use of transmitting devices of radiocommunication systems. The method of in situ measurements of the electromagnetic field – specific requirements]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 2(92), 89–131.

Bieńkowski P., Zmyślony M., Karpowicz J. i in. (2020). Uwarunkowania ekspozycji ludności na pole elektromagnetyczne związane z użytkowaniem radiokomunikacyjnych sieci w technologii 5G w Polsce [Conditionings of population exposure to electromagnetic fields associated with the rational use of 5G radiocommunication networks in Poland]. Med. Pr. Work Health Saf. 71(2), 245–253.

Bieńkowski P. (2023a). Historia i teraźniejszość telefonii komórkowej w Polsce. [W:] Bezpieczeństwo radiacyjne – promieniowanie jonizujące i niejonizujące. [Red.] P. Ulański, M. Długosz-Lisiecka, E.M. Nowosielska. WAT, Warszawa, 9–16.

Bieńkowski P. (2023b). 5G – fakty i mity – technika w przededniu wdrożenia systemu. [W:] Bezpieczeństwo radiacyjne – promieniowanie jonizujące i niejonizujące. [Red.] P. Ulański, M. Długosz-Lisiecka, E.M. Nowosielska. WAT, Warszawa, 297–304.

Boussad Y., Chen X.L., Legout A. i in. (2022). Longitudinal study on exposure to radiofrequencies at population scale. Environ. Int. 162, 107144.

Gryz K., Karpowicz J. (2019). Radiofrequency electromagnetic exposures during the use of wireless links of portable computers inside trains without internal Wi-Fi services. Proceedings of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), Barcelona, Spain, 2-6.09.2019, 978-1-7281-0594-9/19@2019 IEEE, 1030–1033.

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2021a). Empiryczna ocena elektromagnetycznych skutków rozwoju miejskich sieci radiokomunikacyjnych z perspektywy szpitala klinicznego (2014-2021) [Empirical assessment of the electromagnetic effects of the development of urban radiocommunication networks from the perspective of a clinical hospital (2014-2021)] Inż. Fiz. Med. 5(10), 423–427.

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2021b). Pole elektromagnetyczne emitowane przez systemy radiokomunikacyjne – zmiany na terenie Warszawy w XXI wieku [Electromagnetic field emitted by radiocommunication systems – changes in Warsaw in the 21st century]. Bezp. Pr. 7(598), 5–9.

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2022a). Problematyka oceny w budynkach użyteczności publicznej oddziaływania na pracowników promieniowania elektromagnetycznego systemów radiokomunikacyjnych [Assessing the impact of electromagnetic radiation of radiocommunication systems on workers in public buildings]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(114), 99–109.

Gryz K., Karpowicz J., Zradziński P. (2022b). Complex electromagnetic issues associated with the use of electric vehicles in urban transportation. Sensors 22, 1719.

Karpowicz J., Bortkiewicz A., Gryz K. i in. (2008a). 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 [Electromagnetic fields and radiation of frequency 0 Hz - 300 GHz. Rationale documentation for revision harmonizing workers' permissible exposure level with the Directive 2004/40/EC]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(58), 7–45.

Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P. (2008b). Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności

z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE dotyczącej bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych [Principles of using computer simulation for conformity assessment in accordance with Directive 2004/40/EC regarding occupational safety in electromagnetic fields]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(58), 103–135.

Karpowicz J., Miguel-Bilbao S., Zradziński P. i in. (2018a). Comparative study of radiofrequency electromagnetic exposure in the public shopping centers. Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, Netherlands, pp. 972–975, August 2018, IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8485113.

Karpowicz J., Simunic D., Gryz K. (2018b). Can electromagnetic field exposure caused by mobile communication systems in a public environment be counted as dominant? [W:] Mobile communication and public health. [Red.] M. Markov. CRC Press Taylor & Francis Group, 101–127.

Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P. (2021). Oddziaływanie systemów radiokomunikacyjnych (RTV, 2G, 4G, 5G) na wielkomiejskie środowisko elektromagnetyczne. [W:] Aktualny stan prawny ochrony przed promieniowaniem jonizującym i polami elektromagnetycznymi 0-300 GHz w Polsce. [Red.] M. Zmyślony, E.M. Nowosielska. WAT, Warszawa, 221–229.

Koppel T., Ahonen M., Carlberg M. i in. (2019). Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment. Oncol. Lett. 18, 5383–5391.

Korniewicz H., Karpowicz J., Gryz K. i in. (2001). Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 2(28), 97–238.

Ministerstwo Cyfryzacji (2018). Strategia 5G dla Polski. https://www.gov.pl/documents/31305/436699/Strategia+5G+dla+Polski.pdf/0cd08029-2074-be13-21c8-fc1cf09629b0 [dostęp/cited: 18.12.2023].

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. T.j. DzU 2018, poz. 331.

Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2. Część E „Pole elektromagnetyczne". DzU 2018, poz. 1286 ze zm.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 grudnia 2013 r. w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości. T.j. DzU 2018, poz. 1612.

SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (2015). Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). SCENIHR adopted this opinion at the 9th plenary meeting on 27 January 2015.

UKE, Urząd Kontroli Elektronicznej (2018). Informacja o zajętości widma w pasmach 420 MHz, 450 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz. https://bip.uke.gov.pl/dostepnosc-czestotliwosci/informacja-o-zajetosci-widma-tresci/informacja-o-zajetosci-widma-w-pasmach-420-mhz-450-mhz-800-mhz-900-mhz-1800-mhz-2100-mhz-2600-mhz,13.html [dostęp/cited: 18.12.2023].

UKE, Urząd Kontroli Elektronicznej (2022). Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2021 r. https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-rynku-telekomunikacyjnego-w-2021-r-,431.html [dostęp/cited: 18.12.2023].

UKE, Urząd Kontroli Elektronicznej (2023). Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2022 r. https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-rynku-telekomunikacyjnego-w-2022-roku,485.html [dostęp/cited: 18.12.2023].

Zmyślony M., Bieńkowski P., Bortkiewicz A. i in. (2020). Ochrona zdrowia ludności przed zagrożeniami elektromagnetycznymi – wyzwania wynikające z planowanego w Polsce wdrożenia systemu radiokomunikacji standardu 5G [Protection of the population health from electromagnetic hazards – challenges resulting from the implementation of the 5G network planned in Poland]. Med. Pr. Work Health Saf. 71(1), 105–113.

Zradziński P. (2015). Difficulties in applying numerical simulations to an evaluation of occupational hazards caused by electromagnetic fields. Int. J. Occup. Saf. Ergon. 21(2), 213–220.

Zradziński P. (2016). Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne [Conditions of using numerical workers' models while assessing direct hazards related to exposure to electromagnetic field]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(90), 75–89.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. i in. (2021). Internet Rzeczy w przemyśle i życiu codziennym. [W:] Aktualny stan prawny ochrony przed promieniowaniem jonizującym i polami elektromagnetycznymi 0-300 GHz w Polsce. [Red.] M. Zmyślony, E.M. Nowosielska. WAT, Warszawa, 103–116.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. (2022a). Podstawy oceny elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych urządzeń Internetu Rzeczy/Principles of evaluating the electromagnetic aspects of using wearable Internet of Things devices. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(114), 7–38.

Zradziński P., Karpowicz J., Gryz K. (2022b). Ocena elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych lokalizatorów [Evaluation of the electromagnetic circumstances of using wearable locators]. Podst. Met. Oceny Srodow. Pr. 4(114), 65–78.