

© ПЕРОВ С.Ю., БЕЛАЯ О.В., 2023

Читать
онлайн
Read
online

Перов С.Ю., Белая О.В.

Электромагнитная обстановка, создаваемая базовыми станциями сотовой связи в пилотной зоне 5G

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», 105275, Москва, Россия

Введение. В условиях внедрения систем сотовой связи поколения 5G в городскую среду ожидается изменение воздействия электромагнитных полей на население — общего уровня электромагнитного фона, его спектрального состава и пространственно-временного распределения, что требует инструментального контроля и гигиенической оценки фактора.

Материалы и методы. Проведены частотно-селективные, кодо-селективные и широкополосные измерения для оценки фактической и перспективной электромагнитной обстановки, создаваемой базовыми станциями сетей сотовой связи различных стандартов (GSM, UMTS, LTE и 5G/IMT-2020) в отдельных точках на территории пилотной зоны 5G.

Результаты. Исследования показали, что фактические уровни ЭМП не превышали 1,5 мкВт/см² и были обусловлены преимущественно работой базовых станций стандартов GSM и LTE в диапазоне частот 1800 МГц. В отдельных точках основной вклад в максимально возможные условия экспозиции ЭМП, которые не превышали 8,5 мкВт/см², вносили уровни, создаваемые лучом передачи трафика от базовой станции стандарта 5G/IMT-2020 к абонентскому терминалу.

Ограничение исследования определялись условиями проведения измерений в отношении тестовых режимов работы БС стандарта 5G/IMT-2020 в пилотной зоне, что затрудняло оценку фактических уровней ЭМП, создаваемых при обслуживании абонентов коммерческих сетей.

Заключение. В условиях интенсивного развития беспроводных технологий и систем радиосвязи применение частотно- и кодо-селективных средств измерений необходимо для совершенствования инструментального контроля и оценки уровней ЭМП, создаваемых БС различных стандартов сотовой связи, в особенности поколения 5G.

Ключевые слова: электромагнитное поле; гигиеническая оценка и контроль; базовая станция; сотовая связь; поколение 5G

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Перов С.Ю., Белая О.В. Электромагнитная обстановка, создаваемая базовыми станциями сотовой связи в пилотной зоне 5G. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(6): 538–543. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-538-543> <https://elibrary.ru/xutaxa>

Для корреспонденции: Перов Сергей Юрьевич, доктор биол. наук, зав. лаб. электромагнитных полей ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова», 105275, Москва. E-mail: perov@iriioh.ru

Участие авторов: Перов С.Ю. — концепция и дизайн исследования, сбор материала, редактирование, ответственность за целостность всех частей статьи; Белая О.В. — концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, написание текста, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнялось в рамках государственного контракта с Департаментом информационных технологий Москвы (государственный контракт № ГК 6401/20-3415 от 10.02.2020 г.).

Поступила: 15.02.2023 / Принята к печати: 07.06.2023 / Опубликована: 30.07.2023

Sergey Yu. Perov, Olga V. Belaya

Electromagnetic environment created by mobile communication base stations in the 5G pilot area

Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation

Introduction. In the context of 5G system integration for general public, the change of electromagnetic field background is expected. The electromagnetic field background will change in spectral composition, spatial and temporal distribution, which affects the methodological approaches of instrumental control and hygienic assessment.

Materials and methods. In the 5G pilot area the frequency-selective, code-selective and broadband measurements were carried out for the actual and possible electromagnetic field assessment from GSM, UMTS, LTE and 5G/IMT-2020 base station at several points.

Results. The research results have shown that the actual electromagnetic levels did not exceed 1.5 μW/cm², the main part of actual (measured) level includes GSM and LTE base stations (1800 MHz). At some points, the main part of maximum possible electromagnetic field exposure did not exceed 8.5 μW/cm² and created by the 5G/IMT-2020 traffic transmission beam from base station to the subscriber terminal.

Limitations. The limitation of study is determined by the measurement conditions of 5G/IMT-2020 test operation modes in the pilot area, it is difficult to assess the actual EMF exposure from commercial networks user service.

Conclusion. In the intensive progress of mobile communication, the frequency- and code-selective measuring instruments are necessary to improve approaches for instrumental control and evaluation for electromagnetic fields from various mobile communication, especially for 5G assessment.

Keywords: electromagnetic field; hygienic assessment and control; base station; mobile communication; 5G assessment

Compliance with ethical standards. The study does not require submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Perov S.Yu., Belaya O.V. Electromagnetic environment created by mobile communication base stations in the 5G pilot area. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(6): 538–543. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-538-543> <https://elibrary.ru/xutaxa> (In Russ.)

For correspondence: Sergey Yu. Perov, MD, PhD, DSci., Head of Electromagnetic field laboratory, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation. E-mail: perov@iriioh.ru

Information about authors: Perov S.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-6903-4327> Belaya O.V., <https://orcid.org/0000-0003-3937-4950>

Contribution: Perov S.Yu. — the concept and design of study, collection material, editing, responsibility for the integrity of all parts of the article; Belaya O.V. — the concept and design of study, collection and processing of material, writing a text, responsibility for the integrity of all parts of the article. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had sponsorship from Moscow information technological department (state contract N GK 6401/20-3415 from 10.02.2020).

Received: February 15, 2023 / Accepted: June 7, 2023 / Published: July 30, 2023

Введение

В условиях масштабной цифровизации общества и повсеместного применения беспроводных технологий передачи данных проблемы гигиенической оценки и контроля электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП) антропогенной природы как фактора среды обитания человека приобретает особую важность. Активному внедрению мобильных технологий в городскую инфраструктуру, направленной на социально-экономическое развитие и повышение уровня жизни населения [1], сопутствуют устойчивое увеличение количества источников ЭМП и существенное изменение электромагнитной обстановки (ЭМО) на селитебной территории. Эти особенности характерны для систем сотовой связи, составляющих основную, постоянно изменяющуюся часть всей совокупности радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, в результате совместной работы которых формируется ЭМО городской среды. В 2021 г. базовые станции (БС) систем сотовой связи составляли более 97% в структуре РЭС, ежегодно обследуемых Роспотребнадзором для определения негативной нагрузки и степени воздействия на состояние здоровья человека источников приоритетных физических факторов [2]. Вместе с тем сохраняется высокая потребность в увеличении трафика передачи данных, особенно в крупных городах. Это можно оценить по показателю плотности подвижной радиотелефонной связи, который в 2021 г. вырос в Российской Федерации на 6,15% (до 220,91 абонентских устройств (АУ) на 100 человек), в Москве и Московской области – на 13,48% (до 364,27 АУ на 100 человек), в Санкт-Петербурге и Ленинградской области – на 7,51% (до 288,18 АУ на 100 человек) [3].

В настоящее время для систем сотовой связи действующих стандартов (GSM, UMTS, LTE), работающих в диапазоне частот 450–2700 МГц, наблюдается количественное преобладание БС поколения 4G, причём модернизация мобильных сетей БС часто проводится с использованием тех же частотных диапазонов, но с переходом на новый стандарт связи, что позволяет увеличить пропускную способность сети. В долгосрочной перспективе реализация системных преобразований экономики и полное обеспечение растущих потребностей абонентов в трафике передачи данных основаны на внедрении систем последующих поколений, работающих преимущественно в диапазоне частот выше 3 ГГц. Современный этап развития сотовой связи определяется развёртыванием мобильных сетей нового стандарта 5G/IMT-2020, технические особенности которых позволяют работать в новых частотных диапазонах (410–7125 МГц; 24,25–52,6 и 52,6–71 ГГц) и увеличить ширину радиоканала до 100; 400 и 2000 МГц в соответствующих диапазонах [4], а также активно применять антенное оборудование с технологиями формирования и сканирования луча. Ожидаемая интеграция систем сотовой связи поколения 5G в городскую среду приведёт к изменениям общего уровня электромагнитного фона и его спектрального состава, а также к усилению пространственно-временной неоднородности ЭМП в среде обитания человека.

Зарубежные страны развёртывают мобильные сети поколения 5G с 2019 г., одновременно выполняя исследования воздействия ЭМП, создаваемых новыми источниками, в ответ на повышенную обеспокоенность общества внедрением современных систем сотовой связи – фактора риска для здоровья населения [5–9, 11].

По данным исследований, во Франции на 43 площадках пилотных развёртываний сетей 5G, работающих в диапазоне 3400–3800 МГц с применением антенных технологий «massive MIMO», уровни ЭМП РЧ на расстоянии от 35 до 200 м от БС составили от 0,01 до 0,6 В/м (до 0,1 мкВт/см²) при отсутствии трафика передачи данных [5]. С помощью модельных исследований уровней ЭМП РЧ, создаваемых антеннами БС сотовой связи в районах с плотной городской застройкой при различных сценариях модернизации сетей, было показано, что оптимизация сетей поколения 4G

без использования стандарта 5G привела бы к увеличению среднего уровня экспозиции примерно на 66% и увеличила бы в 6 раз количество точек, где уровни ЭМП превышали 6 В/м (9,5 мкВт/см²) [7]. В рамках исследования 33 площадок с эксплуатацией БС стандартов поколений 2–5G в 18 городах Великобритании [9] максимальные зафиксированные уровни ЭМП РЧ составили 7,1% от нормативов ICNIRP [10], при этом максимальный вклад технологии пятого поколения в общий уровень электромагнитного фона не превышал 0,04% от нормативов ICNIRP. Результаты измерений уровней ЭМП РЧ на Мальте показали, что максимально возможный вклад БС поколения 5G, работающих в диапазоне 3,6–3,7 ГГц и настроенных на 100%-ю искусственную загрузку, составлял 11% от общего уровня электромагнитного фона, тогда как средний уровень ЭМП составил не более 0,13% от нормативных значений ICNIRP [11].

Рассмотренные результаты зарубежных исследований позволяют оценить возможные уровни воздействия ЭМП на население при различных условиях эксплуатации базовых станций поколения 5G, в том числе на этапе коммерческих запусков сетей. Однако с учётом особенностей и различий национальных гигиенических регламентов зарубежные данные могут характеризовать подобное воздействие ЭМП применительно к российским условиям лишь косвенно. Это определяет актуальность проведения собственных исследований уровней ЭМП, создаваемых системами сотовой связи поколения 5G, а также изучение методологических вопросов инструментального контроля и гигиенической оценки фактора. В международной гигиенической практике для измерения и оценки уровней ЭМП, создаваемых базовыми станциями сотовой связи различных стандартов, широкое применение получили селективные методы контроля, которые позволяют определить фактические и оценить наихудшие уровни ЭМП, а также установить вклад в общий электромагнитный фон отдельных источников, что особенно важно для детального исследования ЭМО при внедрении в эксплуатацию новых источников ЭМП совместно с уже действующими [12, 13]. Однако в Российской Федерации подобные методы инструментального контроля, несмотря на необходимость их внедрения [14, 15], до настоящего времени не регламентированы, а единичные исследовательские работы с использованием селективных средств измерений [16–18] не раскрывают всех возможностей рассматриваемых подходов.

Цель исследования – инструментальная оценка фактической и перспективной электромагнитной обстановки, создаваемой базовыми станциями сетей сотовой связи различных стандартов, на территории пилотной зоны 5G.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась детальная ЭМО, создаваемая совместной работой БС сотовой связи поколений 2–5G. С помощью селективных средств инструментального контроля ЭМП исследовали реальную обстановку условий экспозиции в момент проведения натурных измерений и перспективную обстановку, моделирующую наихудший с гигиенических позиций случай одновременной работы всех рассматриваемых БС при их максимальной нагрузке.

Исследование проведено на территории микрорайона пилотной зоны тестирования сети поколения 5G, где располагались 16 БС различных стандартов сотовой связи, включая GSM 900/1800, UMTS 900, UMTS 2100, LTE 800, LTE 1800, LTE 2600 и 5G/IMT-2020. Для проведения натурных исследований ЭМО были определены три площадки исходя из возможности пребывания на них населения, близости к социальным объектам, а также с учётом диаграмм направленности антенн БС. На каждой площадке на высоте 1,5 м от поверхности земли с помощью предварительной оценки посредством широкополосных измерений была определена точка наибольшего общего уровня ЭМП, в которой проводились последующие исследования.

Таблица 1 / Table 1

Параметры радиоканалов БС поколений 2–5G
2–5G generations base station (BS) channels' parameters

Стандарт Standard	Полоса частот, МГц Frequencies band, MHz	Ширина радиоканала, МГц Radiochannel bandwidth, MHz	Число каналов Number of channels	Коэффициент экстраполяции K Extrapolation factor K
GSM 900	935–960	0.2	14	2, 3, 4
GSM 1800	1805–1880	0.2	13	2, 3, 4
UMTS 900	935–960	5	3	10
UMTS 2100	2110–2170	5	10	10
LTE 800	791–820	5	3	300
LTE 1800	1805–1880	15, 20	3	900, 1200
LTE 2600	2620–2690	10, 20	5	600, 1200
5G/IMT-2020	4400–5000	100	1	0.8

В каждой точке в дневное и вечернее время выполнено по три серии измерений, каждая из которых включала частотно-селективные, кодо-селективные и широкополосные. Дополнительно в каждой точке проведено три серии частотно-селективных измерений в режиме передачи трафика от БС стандарта 5G/IMT-2020 к абонентскому терминалу (АТ), расположенному на расстоянии 12 м от точки измерений. В качестве средства измерений использовался селективный измеритель ЭМП SRM-3006, оснащённый антенной 3502/01 и опциями демодуляции сигналов стандартов UMTS и LTE (Narda Safety Test Solutions, Германия).

Широкополосные измерения проводились во всём рабочем диапазоне частот используемой измерительной антенны, то есть в диапазоне частот от 420 МГц до 6 ГГц, и использовались для оценки общего уровня ППЭ, создаваемого в результате совместной работы БС всех рассматриваемых стандартов сотовой связи 2–5G, а также других возможных воздействий радиоэлектронных средств.

Частотно-селективные измерения выполнялись по отдельным частотным каналам стандартов GSM, UMTS, LTE и 5G/IMT-2020 с учётом соответствующей ширины радиоканала в зависимости от стандарта: для БС стандартов GSM измерялся максимальный уровень ППЭ в каждом широкополосном канале управления ВССН (англ. Broadcast Control Channel) шириной 200 кГц; для БС стандартов UMTS – средний уровень ППЭ в каждом радиоканале шириной 5 МГц; для БС стандартов LTE – средний уровень ППЭ в каждом радиоканале шириной 3; 5; 10; 15 или 20 МГц; для БС стандарта 5G/IMT-2020 – средний уровень ППЭ в радиоканале шириной 100 МГц.

Кодо-селективные измерения проводили с использованием соответствующих модулей демодуляции стандартов UMTS и LTE для определения уровней ППЭ, создаваемых отдельными компонентами сигнала БС, которые передаются на постоянном уровне мощности в определённой полосе частот и не зависят от уровня трафика. Для БС стандартов UMTS измеряли максимальный уровень ППЭ для каждого первичного общего пилотного канала Р-СРІСН (англ. Primary Common Pilot Channel), а для БС стандартов LTE измеряли максимальный уровень ППЭ для каждого опорного сигнала RS (англ. Reference Signal).

Для характеристики фактической ЭМО, наблюдавшейся в момент проведения натурных исследований, использовали результаты не только широкополосных, но и частотно-селективных измерений, позволяющие оценить вклад отдельных стандартов сотовой связи в общий уровень электромагнитного фона. Для оценки перспективной ЭМО, ожидаемой в случае одновременной наибольшей загрузки всех рассматриваемых БС, использовали результаты частотно- и кодо-селективных измерений с учётом соответствующих коэффициентов экстраполяции, что позволило также определить вклад отдельных стандартов сотовой связи в максимально

возможный уровень электромагнитного фона. Данные об используемых коэффициентах экстраполяции, представленные в табл. 1, определялись частотно-временными параметрами конкретного стандарта сотовой связи и конфигурации БС [12, 19]. Максимальные уровни ЭМП, создаваемых БС стандарта 5G/IMT-2020, которая была оснащена антенной massive MIMO, оценивали с помощью частотно-селективных измерений при обеспечении режима передачи данных от БС к АТ [20], в котором скорость передачи данных составляла от 700 до 1500 Мб/с.

По итогам обработки результатов частотно-селективных измерений для оценки фактической ЭМО определяли общий фактический уровень ЭМП по формуле (1):

$$ППЭ_{факт}^{2-5G} = \sum_i ППЭ_{CH_i}^{GSM} + \sum_j ППЭ_{CH_j}^{UMTS} + \sum_k ППЭ_{CH_k}^{LTE} + ППЭ_{CH}^{5G}, \quad (1)$$

где $ППЭ_{факт}^{2-5G}$ – фактический уровень ППЭ, создаваемый БС стандартов GSM, UMTS, LTE, 5G/IMT-2020, мкВт/см²; $ППЭ_{CH_i}^{GSM}$, $ППЭ_{CH_j}^{UMTS}$ – уровни ППЭ, измеренные для $ППЭ_{CH_k}^{LTE}$, $ППЭ_{CH}^{5G}$ отдельных каналов GSM, UMTS, LTE и 5G/IMT-2020 соответственно, мкВт/см².

По итогам обработки результатов частотно- и кодо-селективных измерений для оценки перспективной ЭМО определяли общий максимальный уровень ЭМП по формуле (2):

$$ППЭ_{max}^{2-5G} = \sum_i ППЭ_{BCC_{H_i}}^{GSM} \cdot K_i^{GSM} + \sum_j ППЭ_{P-CPICH_j}^{UMTS} \cdot K_j^{UMTS} + \sum_k ППЭ_{RS_k}^{LTE} \cdot K_k^{LTE} + ППЭ_{CH}^{5G} \cdot K^{5G}, \quad (2)$$

где $ППЭ_{max}^{2-5G}$ – максимально возможный уровень ППЭ, создаваемый БС стандартов GSM, UMTS, LTE, 5G/IMT-2020, мкВт/см²; $ППЭ_{BCC_{H_i}}^{GSM}$ – уровень ППЭ, измеренный для i -го канала ВССН, мкВт/см²; K_i^{GSM} – коэффициент экстраполяции для i -го канала ВССН, равный общему количеству частотных каналов; $ППЭ_{P-CPICH_j}^{UMTS}$ – уровень ППЭ, измеренный для j -го канала Р-СРІСН, мкВт/см²; K_j^{UMTS} – коэффициент экстраполяции для j -го канала UMTS, равный отношению максимальной мощности к мощности пилотного канала; $ППЭ_{RS_k}^{LTE}$ – уровень ППЭ, соответствующий сумме опорных сигналов RS для k -го канала LTE, мкВт/см²; K_k^{LTE} – коэффициент экстраполяции для k -го канала LTE, определяемый полосой пропускания канала; $ППЭ_{CH}^{5G}$ – уровень ППЭ, измеренный в радиоканале в режиме передачи трафика от БС стандарта 5G/IMT-2020 к АТ, мкВт/см²; K^{5G} – коэффициент экстраполяции для радиоканала 5G, учитывающий режим дуплекса с временным разделением TDD (Time Division Duplex).

Обработку результатов измерений выполняли с использованием специализированного программного обеспечения SRM-3006_TS (Narda Safety Test Solutions, Германия) и MATLAB R2020a (The MathWorks, США).

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследования фактической ЭМО

The research results of actual electromagnetic environment

Показатель Parameter	Точка 1 / Point 1		Точка 2 / Point 2		Точка 3 / Point 3	
	день / day	вечер / evening	день / day	вечер / evening	день / day	вечер / evening
<i>Широкополосные измерения / Broadband measurements</i>						
Уровень ППЭ, мкВт/см ² PD, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0.74 ± 0.05	0.44 ± 0.01	1.05 ± 0.07	0.43 ± 0.01	0.23 ± 0.06	0.11 ± 0.01
<i>Частотно-селективные измерения / Frequency-selective measurements</i>						
Уровень ППЭ ^{2-5G} _{факт} , мкВт/см ² Energy fluence level, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0.71 ± 0.08	0.53 ± 0.06	1.11 ± 0.13	0.57 ± 0.25	0.29 ± 0.11	0.10 ± 0.02
Вклад GSM 900, % GSM 900 contribution, %	22.9 ± 2.2	0.8 ± 0.1	2.3 ± 0.2	1.9 ± 0.7	1.7 ± 0.6	1.8 ± 0.4
Вклад GSM 1800, % GSM 1800 contribution, %	21.1 ± 8.6	35.2 ± 2.7	41.8 ± 11.6	33.1 ± 12.9	7.3 ± 1.3	13.3 ± 4.4
Вклад UMTS 900, % UMTS 900 contribution, %	4.5 ± 1.1	3.1 ± 0.9	1.0 ± 0.0	3.4 ± 1.3	1.0 ± 0.6	2.6 ± 0.8
Вклад UMTS 2100, % UMTS 2100 contribution, %	16.2 ± 6.8	6.8 ± 0.6	4.0 ± 1.1	2.1 ± 0.9	0.8 ± 0.7	1.4 ± 0.4
Вклад LTE 800, % LTE 800 contribution, %	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0
Вклад LTE 1800, % LTE 1800 contribution, %	10.4 ± 2.5	7.6 ± 2.7	30.1 ± 16.3	29.6 ± 5.1	86.6 ± 1.6	74.3 ± 5.3
Вклад LTE 2600, % LTE 2600 contribution, %	16.6 ± 5.1	35.1 ± 6.8	11.5 ± 4.0	15.4 ± 0.8	2.5 ± 0.6	6.3 ± 0.7
Вклад 5G/IMT-2020, % 5G/IMT-2020 contribution, %	8.2 ± 6.0	11.3 ± 9.2	9.3 ± 12.7	14.6 ± 16.7	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0

Результаты

Результаты исследования позволили провести детальную оценку ЭМО, создаваемой несколькими БС сотовой связи стандартов GSM, UMTS, LTE, 5G/IMT-2020 различных частотных диапазонов, в отдельных точках на территории пилотной зоны 5G. Анализ фактической ЭМО, характеризующей реальные условия экспозиции в момент проведения измерений, представлен в табл. 2 и включает результаты как широкополосных, так и частотно-селективных измерений с определением общих уровней ЭМП и вклада в них отдельных БС по стандартам.

Для всех рассматриваемых точек исследований характерна разница уровней экспозиции ЭМП между дневными и вечерними измерениями. Согласно данным табл. 2, наибольший общий уровень ЭМП, отражающий фактические условия воздействия ЭМП на население, наблюдался в точке № 2 и превышал 1 мкВт/см² в дневное время.

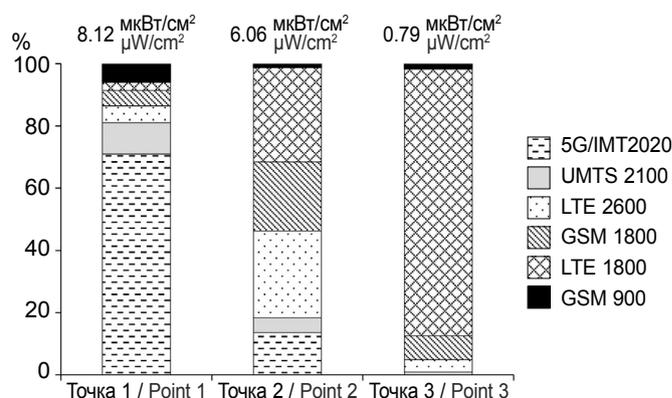
По данным частотно-селективных измерений для всех точек можно отметить неоднородность распределения электромагнитной энергии по частотным диапазонам различных стандартов сотовой связи. В точке № 1 наибольшие фактические уровни ЭМП отмечались для стандартов GSM 1800 и LTE 2600 в вечернее время и составляли в среднем 35,2 и 35,1% соответственно от общего уровня электромагнитного фона. В дневное время наибольший вклад составили стандарты поколения 2G – GSM 900 (22,9%) и GSM 1800 (21,1%).

Наибольший вклад в общие фактические уровни ЭМП в точке № 2 как в дневное, так и в вечернее время приходился на стандарты GSM 1800 (41,8 и 33,1%) и LTE 1800 (30,1 и 29,6%), тогда как в точке № 3 основной вклад составили стандарты LTE 2600 – 86,6 и 74,3%.

Для характеристики фактической ЭМО также проводили оценку уровней ЭМП, создаваемых БС стандарта 5G/IMT-2020 в режиме сканирования (то есть без трафика передачи данных от БС к АТ), которая показала, что во всех точках

измерений вклад нового стандарта составил в среднем 0,2–14,6%, а соответствующие уровни экспозиции не превышали 0,11 мкВт/см².

Применение кодо-селективных измерений ЭМП, создаваемых постоянными составляющими сигналов БС различных стандартов, позволило определить максимально возможные уровни ППЭ для каждого источника в отдельности и по формуле (2) рассчитать суммарные уровни, характеризующие наихудшие с гигиенических позиций условия экспозиции при одновременной работе всех рассматриваемых БС и их максимальной нагрузке. Таким образом, по результатам частотно- и кодо-селективных измерений проведена оценка перспективной ЭМО с определением максимально возможных уровней ЭМП и вклада в них БС отдельных стандартов поколений 2–5G, как представлено на рисунке.



Вклад БС отдельных стандартов поколений 2–5G в максимальные уровни ЭМП.

BS contribution of separated 2–5G generation standards to maximum EMF levels.

Значения максимально возможных уровней ЭМП определяли по формуле (2) с учётом результатов частотно-селективных измерений в режиме передачи трафика от БС стандарта 5G/IMT-2020 к АТ, при котором максимальные уровни ППЭ в радиоканале наблюдались в точке № 1 и составили $5,67 \pm 1,13$ мкВт/см². В точке № 2 при этом режиме соответствующие уровни составили $0,81 \pm 0,05$ мкВт/см², в точке № 3 устойчивый режим передачи данных, необходимый для проведения измерений, реализовать не удалось ввиду значительной удалённости места измерений от БС стандарта 5G/IMT-2020.

Согласно полученным данным, наибольший максимально возможный уровень ЭМП, равный $8,12$ мкВт/см², был получен для точки № 1, ближайшей к БС стандарта 5G/IMT-2020, что соответствовало наибольшему вкладу (68,9%) нового стандарта (см. рисунок). В точке № 2 максимальный уровень ЭМП составил $6,06$ мкВт/см², причём наибольший вклад в экспозицию внесли БС стандартов LTE 1800 (29,8%), LTE 2600 (27,4%) и GSM 1800 (21,7%), тогда как вклад стандарта 5G/IMT-2020 составил не более 13,4%. Для точки № 3 максимально возможный уровень ЭМП не превышал $0,8$ мкВт/см² при наибольшем вкладе в него БС стандарта LTE 1800 (85%).

Для всех точек измерений можно отметить наименьший вклад в максимальные уровни для БС стандарта UMTS 900 (0,4–0,8%) и LTE 800 (0,4–1,5%).

Обсуждение

Рассмотренные данные широкополосных и селективных измерений суммарных уровней ЭМП, характеризующие фактические условия воздействия на население в различных точках на территории пилотной зоны 5G, указывают на приемлемую сходимость результатов различных используемых методов контроля и демонстрируют возможности селективных измерений для оценки вклада каждого стандарта сотовой связи в суммарный уровень электромагнитного фона.

Анализ результатов селективных измерений показал, что наибольший вклад в общие уровни ЭМП, характеризующие фактическую ЭМО, вносили БС, работающие в диапазоне частот 1800 МГц, причём для точек № 1 и № 2 это были системы стандарта GSM, а для точки № 3 – системы стандарта LTE. Полученные данные свидетельствуют о широкой востребованности этого частотного диапазона и могут быть объяснены тенденциями развития и модернизации сетей сотовой связи, в частности перехода систем на новые стандарты в старых диапазонах частот. Однако в перспективной ЭМО соотношение вклада отдельных частотных диапазонов и стандартов изменяется, причём в наибольшей степени это

выражено при приближении к БС стандарта 5G/IMT-2020. Так, уровни экспозиции, создаваемые БС поколения 5G в режиме передачи трафика, могут повышаться в 10 и более раз относительно уровней в режиме сканирования и вносить основной вклад в суммарный уровень ЭМП (порядка 70%). Полученные результаты также показывают, что максимальные уровни ЭМП, создаваемые в том числе и стандартом 5G/IMT-2020, могут приближаться к величине 10 мкВт/см², являющейся гигиеническим нормативом для населения в Российской Федерации.

Ограничения исследования определялись выбранными условиями проведения измерений в отношении тестовых режимов работы БС стандарта 5G/IMT-2020 в пилотной зоне. Полученные результаты для режима сканирования и передачи трафика от БС к АТ характеризуют маловероятную в практике эксплуатации коммерческих сетей сотовой связи ситуацию и могут рассматриваться как имитационные. В настоящее время развитие сетей пятого поколения в Российской Федерации находится на этапе пилотных проектов и тестовых зон, что затрудняет оценку фактических уровней ЭМП, создаваемых при обслуживании нескольких пользователей коммерческих сетей, и требует комплексной оценки ЭМО при наличии нескольких контролируемых режимов работы абонентов.

Заключение

Проведённые исследования ЭМО на территории микрорайона пилотной зоны тестирования сети 5G показали, что фактические условия экспозиции ЭМП в большей части обусловлены работой БС стандартов GSM и LTE в диапазоне частот 1800 МГц, тогда как в максимально возможные условия экспозиции ЭМП основной вклад могут вносить уровни, создаваемые лучом передачи трафика от БС стандарта 5G/IMT-2020 к АТ.

Представленные результаты демонстрируют преимущества использования селективных средств инструментального контроля уровней ЭМП в дополнение к широкополосным средствам не только для детализации вклада отдельных источников в общий уровень электромагнитного фона, но и для прогнозирования максимальных уровней ЭМП, характеризующих наихудшие с гигиенических позиций условия экспозиции ЭМП при одновременной работе всех рассматриваемых БС и их максимальной нагрузке.

В условиях интенсивного развития беспроводных технологий и систем радиосвязи применение частотно- и кодо-селективных средств измерений представляется необходимым для совершенствования инструментального контроля и оценки уровней ЭМП, создаваемых БС различных стандартов сотовой связи, в особенности поколения 5G.

Литература

(п.п. 4–13, 19, 20 см. References)

- Селютин Л.Г. Инновационные технологии «умного города» как фактор социально-экономического развития. В кн.: *Пространственное развитие территорий в условиях цифровизации: социо-эколого-экономические системы: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Грозный; 2020: 40–5. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.CONF.2021.27.58.005>
- Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году». М.; 2022.
- Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: Сведения о проникновении подвижной связи (статистические данные); 2022. Доступно: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-proniknpodvsvyaz/download/>
- Перов С.Ю., Белая О.В., Рубцова Н.Б. Перспективы совершенствования подходов к контролю электромагнитных полей радиочастотного диапазона при внедрении технологий беспроводной связи пятого поколения. *Медицина труда и промышленная экология*. 2022; 62(6): 388–96. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-6-388-396> <https://elibrary.ru/crhgmk>
- Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю. Электромагнитная безопасность: проблемы контроля, управления и регулирования. *Электросвязь*. 2022; (10): 23–30. <https://doi.org/10.34832/ELSV.2022.35.10.004> <https://elibrary.ru/rvfdej>
- Стаценко Л.Г., Бахвалова А.А., Жмакина И.Д. Электромагнитный фон на территории кампуса ДВФУ на о. Русский: инструментальные измерения. *Вестник Инженерной школы ДВФУ*. 2021; (3): 124–32. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-14> <https://elibrary.ru/amhft>
- Тляубердина А.Ш., Антипин Б.М. Оценка уровней излучений радиоэлектронных средств в целях обеспечения электромагнитной безопасности. *СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК*. 2021; (1): 244–7. <https://www.elibrary.ru/dcxhcg>
- Хоршева А.А., Колесник Н.С. Актуальные вопросы контроля уровней электромагнитных полей радиочастотного диапазона по жалобам населения в г. Москве. В кн.: *Развивая вековые традиции, обеспечивая «Санитарный щит» страны: Материалы XIII Всероссийского съезда гигиенистов, токсикологов и санитарных врачей с международным участием, посвященного 100-летию основания Государственной санитарно-эпидемиологической службы России*. Мытищи; 2022: 391–4.

References

- Selyutina L.G. Innovative technologies of “smart city” as a factor of socio-economic development. In: *Spatial Development of Territories in the Conditions of Digitalization: Socio-Ecological and Economic Systems: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Prostranstvennoe razvitiye territoriy v usloviyakh tsifrovizatsii: sotsio-ekologo-ekonomicheskie sistemy: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. Groznyy; 2020: 40–5. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.CONF.2021.27.58.005> (in Russian)
- State report «On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2021». Moscow; 2022. (in Russian)
- Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation: Information on Mobile communications Penetration (statistical data); 2022. Available at: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-proniknupodsvyaz/download/> (in Russian)
- ETSI TS 138 104 V17.7.0 (2022-10) 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 17.7.0 Release 17); 2022. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.0_7.00_60/ts_138104v170700p.pdf
- Assessment of the Exposure of the General Public to 5G Electromagnetic Waves, Part 2: First Measurement Results on 5G Pilots in the 3400–3800 MHz Band; 2020. Available at: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/20200410-ANFR-rapport-mesures-pilotes-5G-EN.pdf>
- Study of the 5G contribution to exposure of the general public to electromagnetic waves Preliminary report (October 2020 to October 2021); 2021. Available at: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/20211214-exposition-5G-EN.pdf>
- Study of the exposure of the general public to radio waves. Simulation of the changes to the exposure of the general public created by mobile telephony in very dense urban areas (Paris XIV). Intermediate report; 2020. Available at: <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/study-exposure-paris14-english.pdf>
- Gledhill M. Exposures to Radiofrequency Fields near 5G Cellsites; 2020. Available at: <https://www.health.govt.nz/system/files/documents/publications/exposures-to-rf-fields-near-5g-cellsites-may2020.pdf>
- Electromagnetic Field (EMF) measurements near 5G mobile phone base stations. Technical Report (version 4); 2021. Available at: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0021/214644/emf-test-summary-010321.pdf
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020; 118(5): 483–524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>
- Assessment of the exposure of the general public to 5G electromagnetic waves – Part 1. Summary of results. November 2021. MCA/R/21-4441; 2021. Available at: https://www.mca.org.mt/sites/default/files/MCA_R_21_4441_Assessment%20of%20the%20exposure%20of%20the%20general%20public%20to%205G%20electromagnetic%20waves%20_Part%201_0.pdf
- IEC 62232-2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. International Electrotechnical Commission. Geneva: IEC; 2022.
- Bhatt C.R., Henderson S., Brzozek C., Benke G. Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: an update. *Phys. Eng. Sci. Med.* 2022; 45: 687–704. <https://doi.org/10.1007/s13246-022-01146-y>
- Perov S.Yu., Belaya O.V., Rubtsova N.B. The prospects for radiofrequency electromagnetic fields control approaches improvement under 5G wireless communication technologies introduction. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2022; 62(6): 388–96. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-6-388-396> <https://elibrary.ru/crhgmk> (in Russian)
- Maslov M.Yu., Spodobaev Yu.M., Spodobaev M.Yu. Electromagnetic safety: problems of monitoring, control and regulation. *Elektrosvyaz.* 2022; (10): 23–30. <https://doi.org/10.34832/ELSV.2022.35.10.004> <https://elibrary.ru/rvfdej> (in Russian)
- Statsenko L.G., Bakhvalova A.A., Zhmakina I.D. Electromagnetic background on the feyu campus on the Russky Island: instrumental measurements. *Vestnik Inzhenernoy shkoly DVFU.* 2021; (3): 124–32. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-14> <https://elibrary.ru/amhft> (in Russian)
- Tlyauberdina A.Sh., Antipin B.M. Assessment of radiation levels of radioelectronic means to ensure electromagnetic safety. *SPbNTORES: trudy ezhegodnoy NTK.* 2021; (1): 244–7. <https://www.elibrary.ru/dcxeg> (in Russian)
- Khorsheva A.A., Kolesnik N.S. Actual issues of monitoring the levels of electromagnetic fields of the radio frequency range according to complaints of the population in Moscow. In: *Developing Centuries-Old Traditions, Providing a “Sanitary Shield” of the Country: Materials of the XIII All-Russian Congress of Hygienists, Toxicologists and Sanitary Doctors with International Participation, Dedicated to the 100th Anniversary of the Founding of the State Sanitary and Epidemiological Service of Russia [Razvivaya vekovye traditsii, obespechivaya “Sanitarnyy shchit” strany: Materialy XIII Vserossiyskogo s’ezda gigienistov, toksikologov i sanitarnykh vrachey s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennogo 100-letiyu osnovaniya Gosudarstvennoy sanitarno-epidemiologicheskoy sluzhby Rossii]*. Mytishchi; 2022: 391–4. (in Russian)
- Wuschek M. *Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Station and Broadcast Transmitter Sites*. Pfullingen: Narda Safety Test Solutions GmbH; 2019.
- HJ 1151-2020. Monitoring method for electromagnetic radiation environment of 5G mobile communication base station (on trial); 2020. Available at: <https://www.mee.gov.cn/ywggz/fgbz/bz/bzwb/hxxhj/xgjcfbz/202012/W020201218708307834736.pdf>