



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ СИСТЕМАМИ 5G eMBB НА ГУСТОНАСЕЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В. И. МОРДАЧЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Предложена методика анализа и выполнены оценки средних уровней электромагнитного фона в различных конфигурациях типового сценария Dense urban-eMBB 5G диапазонов частот FR1 и FR2 с учетом вклада излучений абонентских терминалов в средние уровни создаваемого радиочастотного электромагнитного фона. Проанализировано необходимое увеличение спектральной эффективности радиоканалов с целью обеспечения безопасной для населения реализации этого сценария, связанной с использованием технологии ММО и антенн базовых станций, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей в направлении на обслуживаемые абонентские терминалы.

Ключевые слова: сотовая связь, 5G, eMBB, густонаселенная местность, базовая станция, абонентский терминал, точка наблюдения, территориальная плотность трафика, спектральная эффективность, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Радиочастотный электромагнитный фон, создаваемый системами 5G eMBB на густонаселенных территориях / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 12–23. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23>.

RADIO FREQUENCY ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY 5G eMBB SYSTEMS ON DENSE URBAN AREAS

VLADIMIR I. MORDACHEV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A methodology for analyzing and assessing the average electromagnetic background levels in various configurations of a typical Dense urban-eMBB 5G scenario in the FR1 and FR2 frequency ranges is proposed, taking into account the contribution of subscriber terminal radiations to the average levels of generated radio frequency electromagnetic background. The necessary increase in the spectral efficiency of radio channels is analyzed to ensure safe implementation of this scenario for the population, associated with the use of MIMO technology and base station antennas that provide adaptive formation of narrow beams in the direction of the subscriber terminals being served.

Keywords: cellular communications, 5G, eMBB, dense urban area, base station, user's equipment, observation point, area traffic density, spectral efficiency, electromagnetic background.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background Created by 5G eMBB Systems on Dense Urban Areas. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 12–23. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-12-23> (in Russian).

Введение

Планируемый в [1, 2] рост средней территориальной плотности трафика (Area Traffic Capacity, ATC) до 10^7 бит/с/м² в сетях мобильной связи (МС) 5G и до 10^9 бит/с/м² в сетях 6G определяет актуальность разработки практической методики анализа и выполнения оценок ожидаемой интенсивности создаваемого при этом электромагнитного фона (ЭМФ), в первую очередь в местах предоставления услуг eMBB (сверхширокополосной связи) и высокой плотности населения, где интенсивность беспроводного информационного обслуживания максимальна. Подобная методика может быть разработана на основе подхода [3, 4] к анализу статистических характеристик ансамблей электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых пространственно распределенными источниками излучений, используемого при анализе характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) сотовой связи, распределенных по территории.

Цель исследований автора – применение подходов [3, 4] к анализу характеристик ЭМО при различных конфигурациях предложенного в [5, 6] типового сценария Dense urban-eMBB 5G в диапазонах частот FR1 (4 ГГц) и FR2 (30 ГГц), а также оценка средней интенсивности и безопасности создаваемого при этом ЭМФ.

Характеристики сценария Dense urban-eMBB 5G

Пространственная топология систем МС 5G в плотной городской застройке при типовом сценарии Dense urban-eMBB 5G, предложенном в [5, 6], предполагает одно- или двухслойное покрытие территории сайтами макро- и микроуровня (рис. 1). Используемые далее типовые параметры пространственного размещения и излучения БС и АТ из числа рекомендуемых в [5] для различных конфигураций этого сценария приведены в табл. 1.

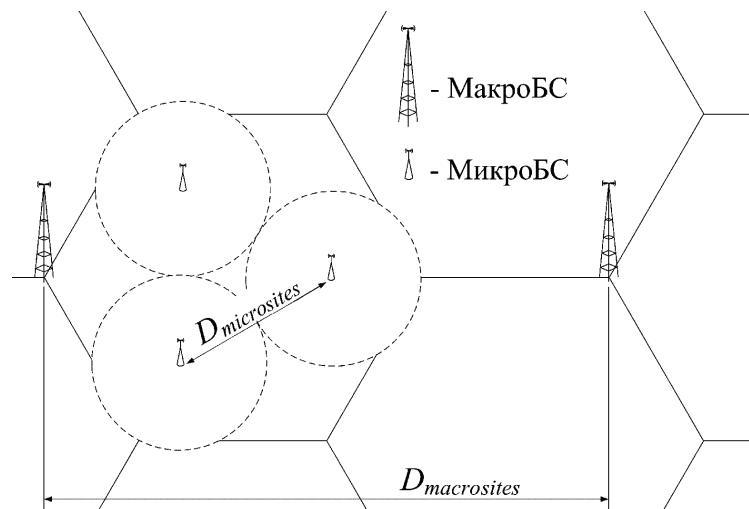


Рис. 1. Пространственная топология сценария Dense urban-eMBB 5G в плотной городской застройке
Fig. 1. Spatial topology of the Dense urban-eMBB 5G scenario in dense urban development

Таблица 1. Типовые параметры пространственного размещения и излучения базовых станций и абонентских терминалов при различных конфигурациях сценария Dense urban-eMBB 5G

Table 1. Typical parameters for the spatial placement and radiation of base stations and subscriber terminals for various configurations of the Dense urban-eMBB 5G scenario

Параметр	Сценарий Dense urban-eMBB для конфигурации		
	А	В	С
Частоты: F_1 – 1-й (макро) слой F_2 – 2-й (микро) слой	1-й слой, $F_1 = 4$ ГГц	1-й слой, $F_1 = 30$ ГГц	1 или 2 слоя (макро + микро). 4 и 30 ГГц доступны в макро- и микрослоях
Высота подвеса антенны БС H_{BS} , м	25	25	25 (для макросайтов) 10 (для микросайтов)

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Параметр	Сценарий Dense urban-eMBB для конфигурации		
	A	B	C
Полная излучаемая мощность в радиоканале с полосой частот ΔF в секторе БС P_{TRPBS} , дБм	44 ($\Delta F = 20$ МГц)	40 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ¹ ≤ 73 дБм	$F_1 = 4$ ГГц: 44 ($\Delta F = 20$ МГц) $F_1 = 30$ ГГц: 40 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ≤ 73 дБм $F_2 = 4$ ГГц: 33 ($\Delta F = 20$ МГц) $F_2 = 30$ ГГц: 33 ($\Delta F = 80$ МГц) ЭИИМ ≤ 68 дБм
Межсайтовое расстояние (расстояние между БС) $D_{macro\text{sites}}, D_{micro\text{sites}}$, м	200	200	Макрослой: 200 Микрослой: случайное размещение БС по территории макросайта
Радиус ² зоны обслуживания (сайта) БС R_{\max} , м	150	150	Макрослой: 150
Средняя территориальная плотность БС $\rho_{BS1,2}$, БС/м ²	$\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$	$\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$	Макрослой: $\rho_{BS1} = (2-3) \cdot 10^{-5}$ Микрослой: $\rho_{BS2} = (2-3) \cdot 10^{-4}$
Полоса частот радиоканала ΔF , МГц	10, 20	40, 80	4 ГГц: 10, 20 30 ГГц: 40, 80
Спектральная эффективность радиоканала (средняя) W_{ER} , бит/с/Гц	7,8	7,8	7,8
КНД ³ антенны БС G_{0BS} , дБ	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР ⁴)	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР)	17–20 (секторн.) 24–30 (АФАР)
Коэффициент шума приемника АТ K_{NUE} , ед./дБ	5/7	10/10	4 ГГц: 5 30 ГГц: 10
Высота антенны АТ H_{UE} , м	1,5	1,5	1,5
Количество АТ, АТ/БС	10	10	10
Полная излучаемая мощность АТ ⁵ P_{TRPUE} , дБм	23	23 ЭИИМ ≤ 43 (АФАР)	4 ГГц: 23 30 ГГц: 23, ЭИИМ ≤ 43 (АФАР)
КНД антенны АТ ⁵ G_{0UE} , дБ	0	5	5
Средняя территориальная плотность излучающих АТ ρ_{UE} , АТ/м ²	$10^{-4}-10^{-3}$	$10^{-4}-10^{-3}$	Макрослой: $10^{-4}-10^{-3}$ Микрослой: $10^{-3}-10^{-2}$

¹ЭИИМ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность.
²С учетом необходимости перекрытия зон обслуживания соседних БС при радиусе описанной окружности зоны обслуживания $R_c = 120$ м в макрослое величина радиуса зоны обслуживания принята $R_{\max} = 150$ м (или 75 % $D_{macro\text{sites}}$) и в микрослое – $R_{\max} = 80-100$ м; последнее обеспечивает площадь зоны обслуживания БС в микрослое, равную примерно 1/3 от площади зоны обслуживания сектора БС макрослоя.
³КНД – коэффициент направленного действия.
⁴АФАР – активные фазированные антенные решетки.
⁵И в БС (конфигурации А, В, С), и в АТ (опционально, конфигурации В, С) планируется применение традиционных ($G_{0BS} = 17-20$ дБ, $G_{0UE} = 0-5$ дБ) сложных антенных систем в виде многоэлементных АФАР с КНД = 20–30 дБ.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, создаваемая излучениями базовых станций

Интенсивность Z_{Σ} [Вт/м²] ЭМФ, создаваемого у земной поверхности электромагнитными излучениями (ЭМИ) радиоэлектронных средств, определяется в виде скалярной суммы плотностей потока мощности Z_1, Z_2, \dots, Z_N ЭМП, создаваемых этими средствами в точке наблюдения (ТН) [3, 4]:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0. \quad (1)$$

Средняя интенсивность ЭМФ (1), в свою очередь, связана со средней электромагнитной нагрузкой на территорию (ЭМНТ), создаваемой этими средствами. Используя технологию [3, 4],

выполним анализ ЭМНТ и интенсивности ЭМФ в ТН у земной поверхности, образуемых ЭМП БС МС при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G.

Для однослойных конфигураций А, В и каждого из слоев конфигурации С при секторной топологии сети N_S , средней территориальной плотности БС ρ_{BS} с числом радиоканалов N_C в каждом секторе и при мощности излучения канальных передатчиков P_{TRPBS} [Вт] электромагнитная нагрузка на территорию B_{BS} [Вт/м²], создаваемая совокупностью БС соответствующего слоя, определяется следующим соотношением:

$$B_{BS} \approx \rho_{BS} P_{TRPBS} N_S N_C. \quad (2)$$

В частности, для данных конфигурации А $\rho_{BS} = (2-3) \cdot 10^{-5}$, $N_S = 3$, $N_C = 1-4$, $P_{TRPBS} = 12,5-25,0$ Вт имеем $B_{BS} \approx 0,001-0,010$ Вт/м². Средняя ЭМНТ связана с суммарной средней интенсивностью ЭМФ, создаваемого в ТН на высоте H_{OP} над земной поверхностью, следующим соотношением:

$$Z_{\Sigma BS} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left(\frac{6,6 H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (3)$$

Оценки интенсивности ЭМФ в городской застройке с использованием (3) носят пессимистический характер, поскольку основаны на многолучевой модели распространения радиоволн (РРВ) [7], не в полной мере учитывающей их затухание из-за затенения ТН зданиями. Зависимости суммарной средней интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ на типовой высоте ТН над поверхностью $H_{OP} = 1,5$ м от ρ_{BS} трехсекторных БС для однослойных конфигураций А, В, отличающихся длиной волны и мощностью ЭМИ БС, при различном числе радиоканалов в секторе N_C приведены на рис. 2.

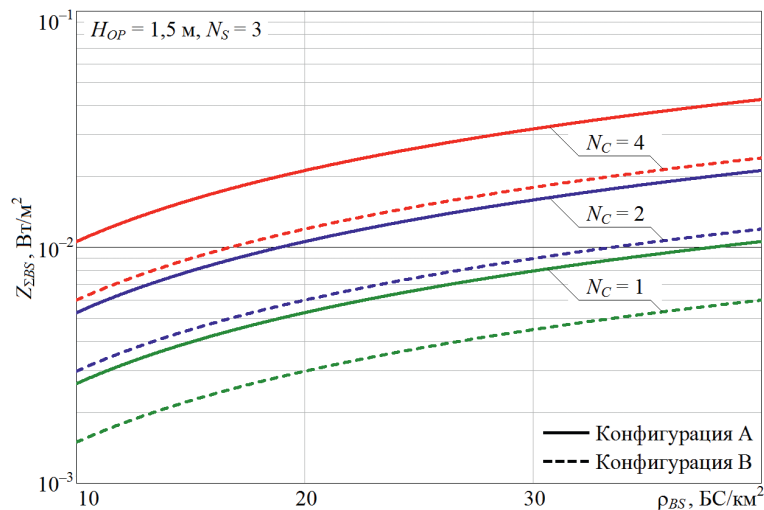


Рис. 2. Зависимость средней интенсивности электромагнитного фона от средней территориальной плотности базовых станций для однослойных конфигураций А, В

Fig. 2. Dependence of the average intensity of the electromagnetic background on the average territorial density of base stations for single-layer configurations А, В

При двухслойной конфигурации С радиосети МС полная излучаемая мощность в радиоканале сектора БС 1-го слоя на порядок превышает таковую во 2-м слое ($P_{TRPBS1} \gg P_{TRPBS2}$). При этом ρ_{BS2} практически на порядок превышает ρ_{BS1} , что делает сопоставимыми уровни средней ЭМНТ (2), создаваемой излучениями БС 1-го и 2-го слоев. Также на соотношение уровней ЭМФ, создаваемого отдельными слоями БС, оказывает влияние и соотношение длин волн λ_1, λ_2 их излучений.

При конфигурации С суммарная средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН на высоте H_{OP} над земной поверхностью излучениями БС обоих слоев, определяется следующим соотношением:

$$Z_{\Sigma BS} \approx \frac{\rho_{BS1} P_{TRPBS1} N_{S1} N_{C1}}{2} \ln \left(\frac{6,6 H_{OP}}{\lambda_1} \right) + \frac{\rho_{BS2} P_{TRPBS2} N_{S2} N_{C2}}{2} \ln \left(\frac{6,6 H_{OP}}{\lambda_2} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\max \{\lambda_1, \lambda_2\}}{4}. \quad (4)$$

В (4) учтена возможность реализации слоев БС с различным количеством секторов (N_{S1} , N_{S2}) и радиоканалов в каждом секторе (N_{C1} , N_{C2}). Для двухслойной конфигурации С зависимости суммарной средней интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ на высоте $H_{OP} = 1,5$ м над поверхностью от $\rho_{\Sigma BS}$ трехсекторных БС, на порядок превышающей территориальную плотность БС верхнего уровня ($\rho_{BS2} = 9\rho_{BS1}$), при различных сочетаниях рабочих частот F_1 и F_2 1-го и 2-го слоев и разным числе радиоканалов N_C в секторе БС приведены на рис. 3.

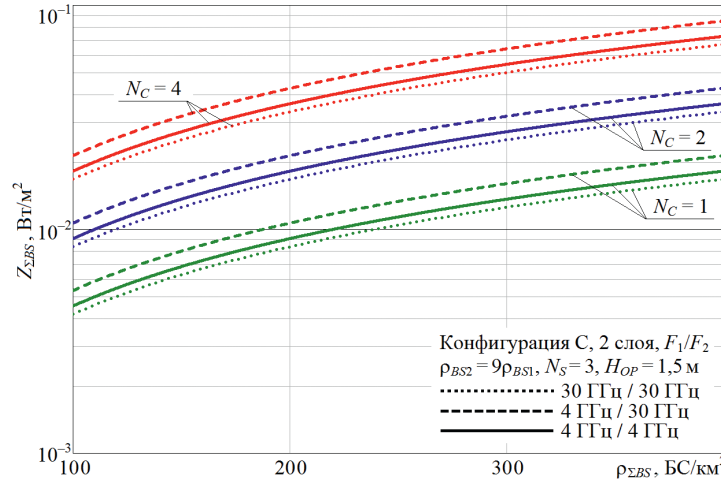


Рис. 3. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от суммарной средней территориальной плотности базовых станций для конфигурации С
Fig. 3. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the average territorial density of base stations for configuration C

Все кривые на рис. 2, 3 находятся ниже уровня $Z_{\Sigma BS} = 0,1$ Вт/м² (10 мкВт/см²), принятого в качестве предельно допустимого уровня (ПДУ) радиочастотных ЭМП для населения, а также близкого к значениям ПДУ ЭМП для многих видов оборудования объектов критической инфраструктуры [8]. Это в определенном смысле может свидетельствовать об электромагнитной безопасности ЭМП БС при всех конфигурациях сценария Dense-Urban-eMBB 5G с параметрами пространственного размещения и электромагнитного излучения БС, принятыми в [5, 6]. Однако в целом этого недостаточно для заключения об электромагнитной безопасности систем MC 5G, реализующих данный сценарий, в силу следующих обстоятельств:

- значительный вклад в интенсивность ЭМФ, создаваемого системами MC, могут вносить излучения АТ [9], что для полноты анализа рассматриваемого сценария 5G требует оценки суммарной интенсивности ЭМФ, образуемого излучениями и БС, и АТ;
- при типовых параметрах [5, 6] всех конфигураций сценария Dense-Urban-eMBB 5G (табл. 1) уровни средней территориальной плотности мобильного трафика АТС существенно меньше пределов 10^7 – 10^9 бит/с/м², декларируемых в [1, 2] для систем 5G/6G, что требует выполнения анализа средних интенсивностей ЭМФ, ожидаемых при приближении к этим пределам.

Эти выводы справедливы при квазинепрерывных ЭМИ БС (FDD). Использование импульсных сигналов (TDD) требует сравнения интенсивностей ЭМФ с ПДУ импульсных ЭМП.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, определяемая с учетом излучений абонентских терминалов

Средняя интенсивность $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН излучающими АТ с ЭИИМ P_{eUE} , распределенными случайно со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] по условной плоскости на высоте H_{OP} , и суммарная средняя интенсивность Z_{Σ} ЭМФ, создаваемого излучениями БС и АТ, определяются следующими соотношениями [9]:

$$Z_{\Sigma UE} \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{13,2\pi H_{UE}^2}{\lambda^2} \right), H_{UE} \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi}, B_{TUE} = \rho_{UE} P_{eUE}, P_{eUE} = P_{TRPUE} G_{0UE}; \quad (5)$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE},$$

где B_{TUE} – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, Вт/м².

Следует заметить, что в отличие от ЭМНТ (2), распределяемой по территории достаточно равномерно в силу близкого к равномерному территориального распределения БС, ЭМНТ, создаваемая излучениями АТ, может быть распределена по территории неравномерно с учетом локального группирования абонентов на различных элементах городской инфраструктуры.

На рис. 4 для однослойных конфигураций А и В приведены расчетные зависимости суммарной средней совокупной интенсивности $Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого излучениями БС и АТ, от параметра k (отношение ρ_{UE} к ρ_{BS} трехсекторных БС (ρ_{UE}/ρ_{BS})) при $H_{OP} = 1,5$ м и различном количестве как канальных радиопередатчиков (TR_x), так и радиоканалов N_C в секторе БС.

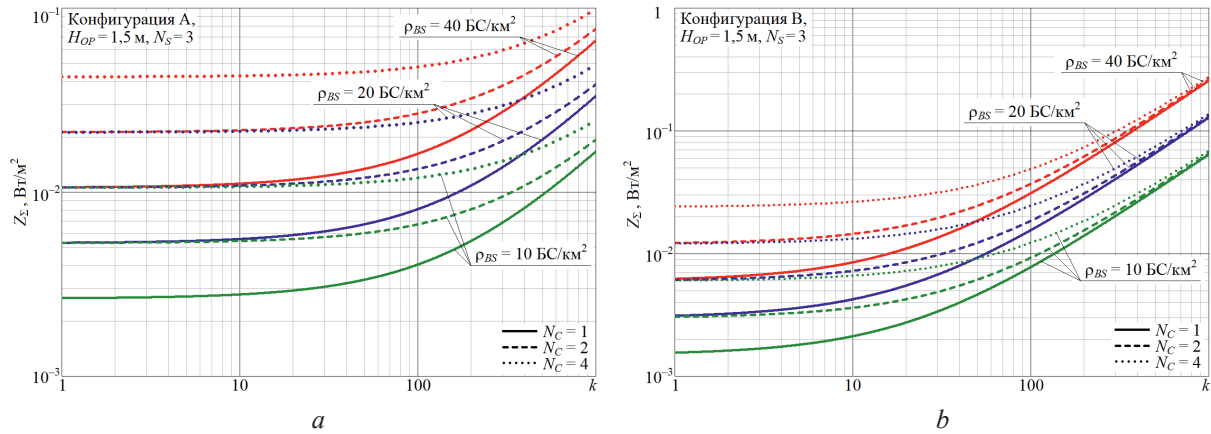


Рис. 4. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра k для конфигураций: а – А; б – В

Fig. 4. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter k for configurations: а – А; б – В

В [5] принято типовое значение $k = 10$, соответствующее равномерному случайному территориальному распределению АТ в каждом секторе обслуживания БС; $k > 10$ соответствует локальному группированию АТ.

На рис. 5 приведены зависимости Z_{Σ} от k для двухслойной конфигурации С при $H_{OP} = 1,5$ м, различных сочетаниях используемых диапазонов частот в макро- и микрослоях, разном числе радиоканалов в секторах БС ($N_{C1} = N_{C2} = 1$ и $N_{C1} = N_{C2} = 4$), при трехсекторной структуре макрослоя ($N_{S1} = 3$) и $N_{S2} = 1$ в микрослое, а также при различной территориальной плотности БС и АТ ($\rho_{BS1} = 10$ и 40 БС/км², $\rho_{\Sigma BS} = \rho_{BS1} + \rho_{BS2} = 10\rho_{BS1}$, $\rho_{UE} = 10k\rho_{BS1} = k\rho_{\Sigma BS}$).

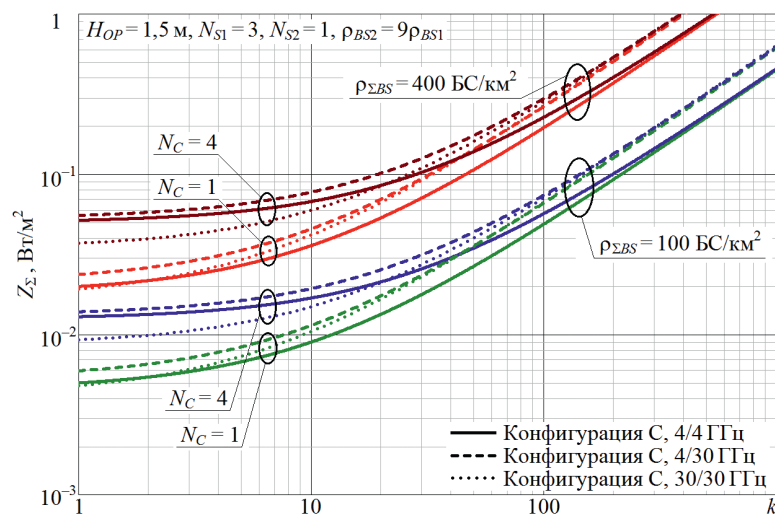


Рис. 5. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра k для вариантов конфигурации С

Fig. 5. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter k for configuration options С

Анализ кривых на рис. 4, 5 свидетельствует о следующем.

1. Наименьшие средние интенсивности совокупного ЭМФ и опасность их приближения к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ при локальном группировании АТ характерны для конфигурации А. Даже при $\rho_{BS} = 40 \text{ БС/км}^2$ и четырехканальном обслуживании территории ($N_C = 4$) следует ожидать приближения средней интенсивности совокупного ЭМФ к ПДУ лишь при локальном увеличении на два порядка ($k \approx 10^3$) средней территориальной плотности излучающих АТ (до $\rho_{UE} \approx 0,04 \text{ АТ/м}^2$) в окрестности ТН. При такой концентрации излучающих АТ их вклад при $N_C = 1$ увеличивает среднюю интенсивность совокупного ЭМФ в 8 раз (на 9 дБ), а при $N_C = 4$ – в 2,5 раза (на 4 дБ), что достаточно существенно.

2. При конфигурации В приближение средней интенсивности совокупного ЭМФ к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ следует ожидать уже при $k = 300\text{--}400$ и $N_C = 4$ (что соответствует $\rho_{UE} \approx 0,011\text{--}0,016$), а также при $k = 800$ и $N_C = 2$ (что соответствует $\rho_{UE} \approx 0,032$) при некотором уменьшении зависимости от N_C с ростом k и ρ_{UE} . Подобная территориальная концентрация АТ на порядок и более увеличивает среднюю интенсивность совокупного ЭМФ, оказывая решающее влияние на ее приближение к опасному ПДУ.

3. В конфигурации С при $\rho_{BS} = 400 \text{ БС/км}^2$ следует ожидать приближения средних интенсивностей совокупного ЭМФ к ПДУ $0,1 \text{ Вт/м}^2$ при локальном увеличении ρ_{UE} в окрестности ТН всего в 2–3 раза при $N_C = 4$ и всего в 3–5 раз при $N_C = 1$. При $\rho_{BS} = 100 \text{ БС/км}^2$, что меньше заявленного для конфигурации С в [5], это приближение к ПДУ следует ожидать при локальном увеличении ρ_{UE} в окрестности ТН всего в 10–20 раз при слабой зависимости от числа радиоканалов N_C .

4. Существенное влияние территориальной плотности БС на интенсивность ЭМФ наблюдается только при равномерном территориальном распределении АТ; оно существенно уменьшается в местах локальной концентрации АТ и относительно мало влияет на достижение критического уровня территориальной плотности излучающих АТ, при котором интенсивность совокупного ЭМФ приближается к ПДУ.

Таким образом, во всех конфигурациях, особенно в С, следует ожидать существенной зависимости средней интенсивности совокупного ЭМФ от степени концентрации излучающих АТ в окрестности ТН. Однако действующей системой гигиенического нормирования вынужденных рисков воздействия антропогенных радиочастотных ЭМП на население это не учитывается.

Средняя интенсивность электромагнитного фона, определяемая с учетом средней территориальной плотности мобильного (беспроводного) трафика

При идентичности всех БС сети (N_S, N_C с полосой частот ΔF радиоканалов в каждом секторе, $W_{ER} = \text{const}$) и средней территориальной плотности БС ρ_{BS} рассматриваемого уровня средняя АТС [бит/с/м²] определяется следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} ATC &= \rho_{BS} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_S, \quad \Delta F_{\Sigma} = N_C \Delta F, & \text{конфигурации А, В;} \\ ATC &= \rho_{BS1} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_{S1} + \rho_{BS2} W_{ER} \Delta F_{\Sigma} N_{S2}, \quad \Delta F_{\Sigma} = N_C \Delta F, & \text{конфигурация С.} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В конфигурации С параметры N_{S1} и N_{S2} в 1-м и 2-м слоях могут отличаться.

Зависимости АТС от суммарной ширины полосы частот радиоканалов ΔF_{Σ} каждого сектора БС для однослойных конфигураций А, В и для двух вариантов конфигурации С рассматриваемого сценария 5G при трехсекторной ($N_{S1} = 3$) топологии макрослоя, $W_{ER} = 7,8$ [5] и при различных ρ_{BS1} в макрослоях и ρ_{BS2} в микрослое приведены на рис. 6. Их интерпретация имеет следующие особенности:

– для двухслойной конфигурации С принято, что территориальная плотность БС микрослоя, располагаемых случайно в зонах обслуживания секторов БС макрослоя, в девять раз превышает среднюю территориальную плотность последних ($\rho_{BS2} = 9\rho_{BS1}$);

– полосы частот радиоканалов при всех конфигурациях сценария могут использоваться для электромагнитного излучения как в режиме частотного дуплекса FDD (тогда в другой полосе частот выделяются каналы радиоприема БС), так и в режиме временного дуплекса TDD. Эта особенность не учитывается: полагается, что суммарная ширина полос частот ΔF_{Σ} радиоканалов каждого сектора БС в каждой конфигурации охватывает полосы частот электромагнитного излучения БС со спектральной эффективностью $W_{ER} = 7,8$.

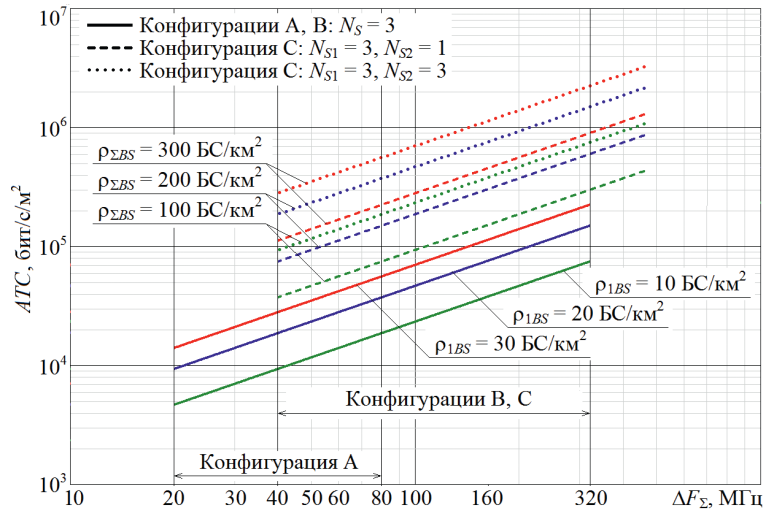


Рис. 6. Зависимость средней территориальной плотности мобильного трафика от суммарной ширины полосы частот радиоканалов в секторах базовых станций

Fig. 6. Dependence of the average territorial density of mobile traffic on the total bandwidth of radio channels in base station sectors

Анализ зависимостей на рис. 6 свидетельствует о том, что при типовых характеристиках [5] рассматриваемого сценария 5G, приведенных в табл. 1, уровень ATC даже в конфигурации С с круговыми диаграммами направленности антенн БС микрослоя и с $N_C = 4$ на каждой БС на порядок ниже декларируемого для 5G предела 10^7 бит/с/м² [2] и может приблизиться к этому пределу лишь гипотетически при трехсекторных БС микрослоя и $\Delta F_\Sigma \rightarrow 1$ Гбит в каждом секторе БС каждого из слоев. Тем не менее интерес представляет и оценка возможных средних уровней ЭМФ, создаваемого излучениями БС при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G, когда средний уровень ATC приближается к указанному пределу.

Средняя территориальная плотность мобильного трафика (6) у земной поверхности, образуемая излучениями БС, однозначно связана со средней интенсивностью Z_Σ сопутствующего радиочастотного ЭМФ [3, 4].

При известных коэффициенте K_N шума радиоприемников АТ (ед.), ширине полосы частот ΔF и реальной средней W_{ER} радиоканала БС→АТ, в m (m – отношение потенциальной и реальной спектральной эффективности) раз худшей по отношению к потенциальной W_{EP} , определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона – Хартли; при длине волны ЭМП БС λ , КНД антенны БС G_{0BS} , радиусе зоны обслуживания БС R_{max} , ограничиваемой чувствительностью радиоприема АТ, и среднем уровне ATC , создаваемой множеством БС у земной поверхности, у этой плоскости создается следующая ЭМНТ [3, 4]:

$$B_{BS}(R_{max}, ATC, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_\Sigma (2^{m W_{ER}} - 1) R_{max}^2 ATC}{\lambda^2 W_{ER} G_{0BS} G_{0UE}}; \quad (7)$$

$$ATC = \rho_{BS} W_{ER} \Delta F, \quad W_{ER} = \frac{W_{EP}}{m} \approx \frac{\log_2 CNIR_R}{m^2}, \quad (8)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура окружающей среды, $T_0 = 290$ К; D_Σ – совокупный запас в мощности излучения БС в сети 5G, ед., связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь на затухание радиоволн при проникновении в здания, потерь на замирания при РРВ в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом в уровне принимаемого сигнала АТ для реализации хендвера; $CNIR_R$ – отношение сигнал/(шум+внутрисистемная помеха) (carrier-to-noise plus intrasystem interference ratio) в реальном радиоканале БС→АТ.

Используя (3), (4) с (7), (8), исследуем зависимости средней интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС на высоте $H_{OP} = 1,5$ м над земной поверхностью при различных конфигурациях рассматриваемого сценария 5G и разных уровнях ATC .

На рис. 7 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для конфигураций А (для $K_N = 5$ дБ, $G_{0BS} = 20$ дБ) и В (для $K_N = 10$ дБ, $G_{0BS} = 30$ дБ) при запасах в мощности излучения БС $D_{\Sigma} = 10^4$, $R_{\max} = 150$ м и различных средних уровнях АТС, декларируемых для систем 4G/5G/6G. Зависимости для диапазона 4 ГГц (конфигурация А) получены для антенн БС с КНД = 20 дБ и для $K_N = 5$ дБ, для диапазона 30 ГГц – 30 дБ (АФАР в режиме beamforming) и 10 дБ соответственно. На рис. 7 горизонтальная сплошная красная линия $Z_{\Sigma BS1} = 10$ Вт/м² соответствует «тепловым» ограничениям ICNIRP [10] на интенсивность радиочастотного ЭМФ для населения; горизонтальная красная пунктирная линия $Z_{\Sigma BS2} = 0,1$ Вт/м² – ПДУ ЭМП, принятому в ряде стран с учетом опасности «нетепловых» эффектов воздействия ЭМП на человеческий организм, а также области ПДУ радиочастотных ЭМП для оборудования критической инфраструктуры [8]; горизонтальная красная штрихпунктирная линия $Z_{\Sigma BS3} = 10^{-3}$ Вт/м² соответствует границе области «уровней особых опасений», установленной стандартами строительной биологии развитых стран [11].

На рис. 8 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для различных вариантов конфигурации С при запасах в мощности излучения БС в макро- и микрослоях $D_{\Sigma 1} = 40$ дБ и $D_{\Sigma 2} = 20$ дБ соответственно и различных значениях средних уровней АТС = АТС₁ + АТС₂, соответствующих декларируемым пределам для систем 4G/5G/6G. Принималось: соотношение средней территориальной плотности трафика во 2-м и в 1-м слоях АТС₂/АТС₁ = 3 (типовой вариант), $G_{0BS} = 20$ дБ, $R_{\max 1} = 150$ м, $R_{\max 2} = 100$ м, $G_{0BS1} = 20$ дБ (4/4, 4/30 ГГц), $G_{0BS1} = 30$ дБ (30/30 ГГц).

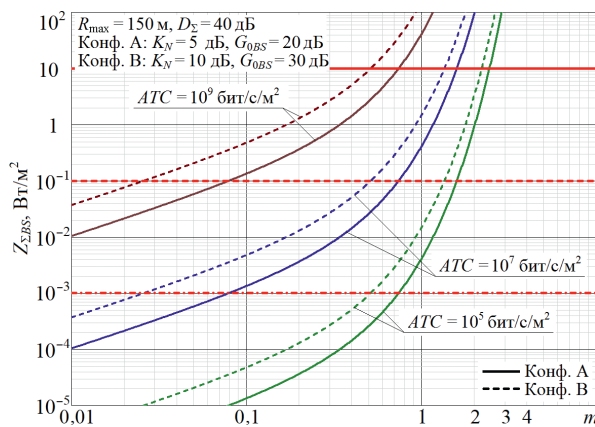


Рис. 7. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для типовых конфигураций А и В
Fig. 7. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for typical configurations A and B

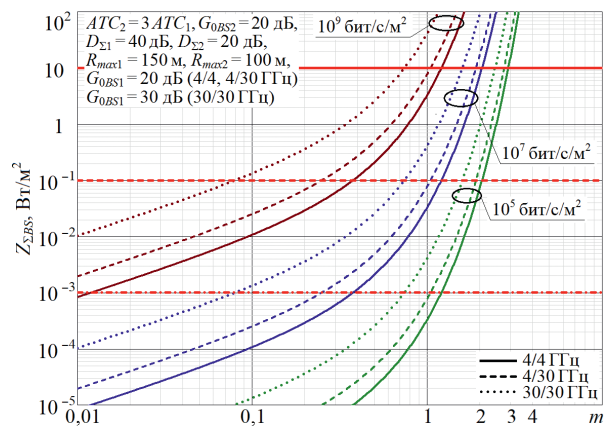


Рис. 8. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для типовой конфигурации С
Fig. 8. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for a typical configuration C

На рис. 9 приведены семейства кривых $Z_{\Sigma BS}(m)$ для тех же вариантов конфигурации С с гипотетическим увеличением в десятки раз территориальной плотности БС 2-го слоя при уменьшении почти на порядок радиусов их зон обслуживания и значительном преобладании средней плотности трафика 2-го слоя ($АТС_2/АТС_1 = 100$). Для такой модификации 2-го слоя принято уменьшение КНД антенн и запаса в мощности излучения БС до 10 дБ. Принималось: $G_{0BS} = 10$ дБ, $D_{\Sigma 1} = 40$ дБ, $D_{\Sigma 2} = 10$ дБ, $R_{\max 1} = 150$ м, $R_{\max 2} = 20$ м, $G_{0BS1} = 20$ дБ (4/4, 4/30 ГГц), $G_{0BS1} = 30$ дБ (30/30 ГГц).

Выбор диапазона изменения значений параметра m при расчетах графиков на рис. 7–9 обусловлен тем, что в системах 5G технология ММО обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности в 2–8 раз [12], для систем 6G рост спектральной эффективности радиоканалов декларируется в 5–10 раз по сравнению с 5G [1]. В современных радиоканалах без использования технологии ММО значение параметра m составляет не менее 1,5–2,0 вследствие неидеальности процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, что позволяет ожидать $m \leq 1,0$ в радиоканалах с ММО в системах 5G и $m \leq 0,1$ в 6G.

Анализ кривых на рис. 7–9 позволяет сделать следующие предварительные выводы.

1. При всех конфигурациях сценария Dense urban-eMBB 5G приближение среднего уровня АТС к 10^5 бит/с/м², декларируемого в качестве предела для систем 4G, может быть причиной

превышения средней интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС, ПДУ 0,1 Вт/м². Но при этом увеличение W_{ER} в 2–3 раза за счет применения технологии ММО способно обеспечить безопасность такого уровня АТС.

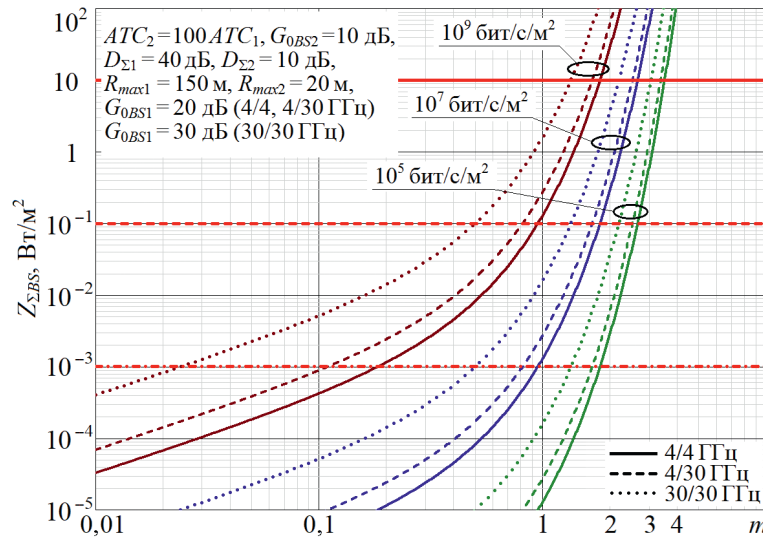


Рис. 9. Зависимость суммарной средней интенсивности электромагнитного фона от параметра m для гипотетической конфигурации С

Fig. 9. Dependence of the total average intensity of the electromagnetic background on the parameter m for a hypothetical configuration C

2. При принятых значениях G_{0BS} , D_{Σ} и приближении АТС к пределу 10^7 бит/с/м², принятому для систем 5G, условие $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² выполняется при $m \leq 0,75$ для конфигурации А и при $m \leq 0,5$ – для В. При принятых значениях G_{0BS1} , G_{0BS2} , $D_{\Sigma1}$ и $D_{\Sigma2}$ в различных вариантах типовой конфигурации С и АТС = 10^7 бит/с/м² условие $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² выполняется при $m \leq 1,15$ для варианта 4/4 ГГц, при $m \leq 1,0$ – для 4/30 ГГц и при $m \leq 0,75$ – для 30/30 ГГц. Это также вполне достижимо за счет ММО, принимая во внимание [12].

3. При принятых значениях G_{0BS1} , G_{0BS2} , $D_{\Sigma1}$ и $D_{\Sigma2}$ и приближении АТС к пределу 10^9 бит/с/м², декларируемому для систем 6G [1], выполнение условия $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² требует $m \leq 0,08$ (конфигурация А), $m \leq 0,015$ (конфигурация В) и $m \leq 0,08$ (конфигурация С, вариант 30/30 ГГц). Обеспечение этого маловероятно даже при очень значительном увеличении спектральной эффективности радиоканалов 6G, прогнозируемом в [1]. Для типовых вариантов конфигурации С с использованием диапазона 4 ГГц, в котором требуются $m \leq 0,4$ (вариант 4/4 ГГц) и $m \leq 0,25$ (вариант 4/30 ГГц), вероятность выполнения условия $Z_{\Sigma BS} \leq 0,1$ Вт/м² при достижении планируемых уровней АТС и W_{ER} более высока.

4. Сравнение зависимостей на рис. 8, 9 иллюстрирует возможности существенного уменьшения интенсивности создаваемого ЭМФ развитием конфигурации С в направлении значительного увеличения территориальной плотности БС 2-го слоя при соответствующем значительном уменьшении их зон обслуживания и мощностей ЭМИ, что способно обеспечить возможность достижения уровня АТС 10^9 бит/с/м² в сетях 6G с безопасным уровнем сопутствующего ЭМФ.

5. Эти выводы не учитывают вклада излучений АТ в среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ. Однако в силу растущей асимметрии удельного трафика АТ (отношения объемов принимаемой и передаваемой информации), достигающей 100 [13], вклад ЭМП АТ в суммарную интенсивность ЭМФ также будет меньше оценочных значений, соответствующих зависимостям на рис. 4, 5. Тем не менее вклад излучений АТ в среднюю интенсивность ЭМФ при реализации сценария Dense urban-eMBB 5G требует дальнейшего изучения.

6. В анализируемом случае без применения технологии ММО и других способов значительного увеличения W_{ER} достижение предельных уровней АТС для 5G/6G чревато крайне опасным превышением интенсивности ЭМФ даже «теплого» ПДУ $Z_{\Sigma BS1}$ [10].

В целом приведенные расчетные оценки дают лишь ориентировочное представление об ожидаемой средней интенсивности ЭМФ при реализации сценария Dense urban-eMBB 5G, поскольку

выполнены лишь для конкретного набора типовых значений параметров, предложенных в [5] и входящих в (2)–(8). Тем не менее эти оценки позволяют иллюстрировать как применимость и адекватность приведенной методики анализа, так и возможные уровни электромагнитного загрязнения среды обитания при бесконтрольном широкомасштабном внедрении технологий и услуг МС 5G/6G в плотной городской застройке с высокой плотностью населения.

Заключение

1. Представленные результаты анализа позволяют сделать вывод, что реализация типовых сценариев Dense urban-eMBB 5G с параметрами базовых станций и абонентских терминалов, заявленными в [5, 6], при которых средняя территориальная плотность мобильного трафика на один-два порядка ниже предела 10^7 бит/с/м², декларируемого для систем 5G, безопасна и для населения, и для оборудования критической инфраструктуры. При этом значительный вклад в интенсивность электромагнитного фона могут вносить излучения абонентских терминалов при их локальном пространственном группировании, что требует учета при оценках электромагнитной безопасности подобных объектов, в частности, при их санитарно-гигиенической паспортизации.

2. Параметры сценария 5G позволяют без ущерба для безопасности приблизиться к максимальной территориальной плотности беспроводного трафика 5G путем увеличения числа обслуживающих территорию радиоканалов базовых станций и их спектральной эффективности при использовании технологии ММО, увеличения коэффициента направленного действия антенн базовых станций за счет: применения как в базовых станциях, так и в абонентских терминалах адаптивных активных фазированных антенных решеток Massive ММО, обеспечивающих адаптивное формирование узких лучей с коэффициентом направленного действия 20–40 дБ и позволяющих увеличить спектральную эффективность радиоканалов за счет соответствующего увеличения $CNIR_R$ в (8); разумного ограничения на минимально необходимом уровне запаса D_Σ в мощности излучения базовых станций; использования, по возможности, более низких рабочих частот, а также повышения реальной чувствительности радиоприема при максимально возможном уменьшении уровней внутрисетевых помех.

3. При анализе безопасности рассмотренного сценария 5G необходимо учитывать, что создаваемая при его реализации интенсивность электромагнитного фона не в полной мере характеризует безопасность систем 4G/5G. Сделанные выше выводы о безопасности сценария 5G справедливы только применительно к технологии FDD, так как для импульсных сигналов TDD 4G/5G, согласно [14], в силу их биологической «агрессивности» необходимо установить существенно более жесткие гигиенические нормативы. Очевидно, что такое же заключение возможно и по отношению к предельно допустимому уровню радиочастотных электромагнитных полей для оборудования критической инфраструктуры, которое может располагаться в плотной городской застройке, поскольку восприимчивость данного оборудования к воздействию радиочастотных электромагнитных полей, как правило, определяется не столько средней, сколько пиковой мощностью этого воздействия.

Список литературы / References

1. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G. Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
2. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. *Rec. ITU-R M.2083*. ITU, 2015.
3. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322 (in Russian).
4. Mordachev V. I. (2019) Estimation of Intensity of Electromagnetic Background, Created by Wireless Systems of Public Information Services, on the Base of Forecast of Traffic Terrestrial Density. *Doklady BGUIR*. (2), 39–49. <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/1066> (in Russian).
5. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020. *Report ITU-R M.2412*. ITU, 2017.
6. The Outcome of the Evaluation, Consensus Building and Decision of the IMT-2020 Process (Steps 4 to 7), Including Characteristics of IMT-2020 Radio Interfaces. *Report ITU-R M.2483*. ITU, 2020.
7. Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz. *Rec. ITU-R P-1411-6*. ITU, 2012.

8. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).
9. Mordachev V. I. (2023) Assessment of the Contribution of Radiations of User Equipment to the Anthropogenic Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 50–58. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58> (in Russian).
10. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020. 118 (5), 483–524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
11. SBM-2008, Standard of Building Biology Testing Methods. *BAUBIOLOGIE MAES, Institute of Biology + Ecology IBN*.
12. *LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction. White Paper*. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-advanced-3gpp-rel-12-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-108294.html.
13. *Ericsson Mobility Reports*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>.
14. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. (2022) The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *CONCEPCI*. 1 (41), 3–17 (in Russian).

Поступила 17.06.2025

Принята в печать 11.09.2025

Received: 17 June 2025

Accepted: 11 September 2025

Сведения об авторе

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the author

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the R&D Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich