



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ОЦЕНКА ВКЛАДА ИЗЛУЧЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В АНТРОПОГЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ СИСТЕМАМИ МОБИЛЬНОЙ (СОТОВОЙ) СВЯЗИ

В. И. МОРДАЧЕВ

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

Поступила в редакцию 09.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Декларируемое увеличение пространственной плотности излучающих периферийных (пользовательских, оконечных и т. п.) устройств (ПУ) мобильной связи до 0,1 ПУ/м² в сетях 4G (LTE), до 1,0 ПУ/м² в сетях 5G (NR) и до 10 ПУ/м² в перспективных сетях 6G может быть причиной недопустимого роста электромагнитного фона и соответствующих вынужденных рисков для здоровья населения. Предложена методика оценки вклада излучений этих устройств в уровень антропогенного электромагнитного фона, создаваемого системами мобильной (сотовой) связи. Методика основана на анализе электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой стационарными и подвижными источниками излучения систем мобильной связи и определяемой территориальной плотностью мобильного трафика, его асимметрией в нисходящей и восходящей передаче данных, степенью концентрации ПУ в окрестности точки наблюдения, спектральной эффективностью радиоканалов мобильной связи, размерами зоны обслуживания базовых станций и рядом других характеристик. Приведены расчетные данные, свидетельствующие о том, что в местах концентрации излучающих ПУ образуемая ими составляющая электромагнитного фона может оказаться преобладающей, многократно превышая вклад излучений базовых станций и определяя фактический уровень вынужденных рисков для здоровья населения, что требует учета в системе их гигиенического нормирования.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, базовая станция, периферийное устройство, электромагнитное излучение, территориальная плотность трафика, вынужденные риски для здоровья.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Оценка вклада излучений пользовательского оборудования в антропогенный электромагнитный фон, создаваемый системами мобильной (сотовой) связи / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 50–58. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58>.

ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF RADIATIONS OF USER EQUIPMENT TO THE ANTHROPOGENIC ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY MOBILE (CELLULAR) COMMUNICATIONS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Submitted 09.02.2023

Abstract. The declared increase in spatial density of user (terminal, peripheral, etc.) radiating equipment (UE) of mobile communications up to 0.1 UE/m² in 4G (LTE) networks, up to 1.0 UE/m² in 5G (NR) networks and up to 10 UE/m² in promising 6G networks may cause an unacceptable increase in electromagnetic background and in corresponding forced risks to public health. The paper proposes a method for assessing the contribution

of UE radiations to the level of anthropogenic electromagnetic background created by mobile communications. This method is based on the analysis of the electromagnetic loading on the area created by stationary and mobile radiation sources of mobile communications and determined by the area density of mobile traffic, its asymmetry in downlink and uplink data transmission, the degree of UE concentration in the observation point vicinity, the radio channels spectral efficiency, the size of base stations service areas and other characteristics. The calculated data are given, indicating that in places of UE concentration, the component of electromagnetic background formed by UE radiations may be predominant, many times exceeding the contribution of base station radiations, and determining the actual level of forced risks to public health, which requires consideration in the system of their hygienic rationing.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, base station, peripheral equipment, electromagnetic radiation, area traffic capacity, forced health risks.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. 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. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58> (in Russian).

Введение

Принято считать, что радиочастотные электромагнитные поля (РЧ ЭМП) излучающих периферийных устройств (ПУ) мобильной (сотовой) связи (МС), используемых для телефонной связи и мобильного интернета (передачи данных), являются источником добровольных рисков для здоровья населения. Этот вид рисков ограничивается гигиеническим нормативом, на порядок менее жестким по сравнению с действующими нормами – 10 мкВт/см², ограничивающими вынужденные риски для здоровья населения с учетом опасности отдаленных негативных последствий воздействия этого антропогенного физического фактора. Однако результаты моделирования электромагнитной обстановки (ЭМО) [1], создаваемой в условиях города излучениями базовых станций (БС) и ПУ МС стандарта GSM (2G), свидетельствуют о том, что при локальном территориальном группировании ПУ, особенно в местах затенения БС элементами городской застройки, уровни составляющей электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемой излучениями ПУ, могут существенно превышать уровни составляющей ЭМФ, создаваемой излучениями БС, и быть основным источником вынужденных рисков для здоровья населения от ЭМП МС. Поэтому следует ожидать, что декларируемое значительное увеличение пространственной плотности излучающих ПУ в сетях МС 4G/5G/6G при приемлемых уровнях добровольных рисков для здоровья ее пользователей может быть причиной недопустимого роста вынужденных рисков для здоровья населения в местах с высокой пространственной плотностью ПУ МС.

Цель исследований автора – оценка вклада излучений ПУ пользователей МС в интенсивность ЭМФ, создаваемого излучениями ПУ и БС перспективных систем МС, и необходимости его учета при оценке вынужденных рисков для здоровья населения.

Основные определения и соотношения

1. Под интенсивностью Z_{Σ} [Вт/м²] радиочастотного ЭМФ в точке наблюдения (ТН) понимается скалярная сумма некоторого множества N значений плотности потока мощности Z_n [Вт/м²], $n \in [1, N]$, РЧ ЭМП, создаваемых источниками, расположенными в зоне их радиовидимости из ТН:

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

2. Источниками РЧ ЭМП являются стационарные БС и мобильные ПУ (UE – user’s equipment, пользовательское оборудование) систем МС. Модель их пространственного размещения изображена на рис. 1. В приведенном на рисунке варианте ПУ представляют собой мобильные телефоны, располагаемые у головы человека, однако в качестве ПУ могут рассматриваться любые периферийные устройства, высота которых H_{UE} над земной поверхностью примерно соответствует высоте H_{OP} ТН. Рассматриваются сценарии, когда высоты H_{BS} антенн БС над земной поверхностью существенно превышают высоты размещения над поверхностью ПУ и ТН: $H_{BS} \gg h \approx H_{OP} \approx H_{UE}$. ТН располагается на высоте 1–2 м над земной поверхностью (в пределах человеческого роста), при сотовой структуре радиосети радиус R_{max} зоны обслуживания БС соответствует размерам сайта.

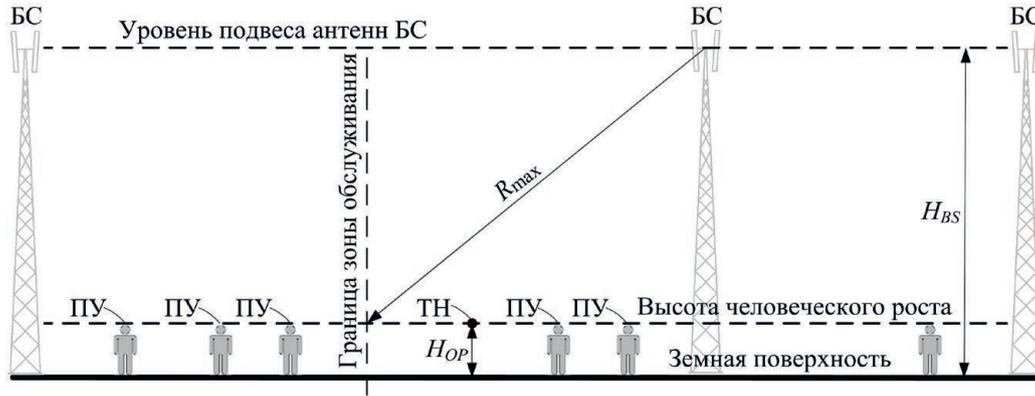


Рис. 1. Модель пространственного распределения периферийных устройств и базовых станций:

БС – базовая станция; ПУ – периферийное устройство; ТН – точка наблюдения

Fig. 1. Model of spatial distribution of peripheral devices and base stations:

BS – base station; PD – peripheral device; OP – observation point

3. Под средней электромагнитной нагрузкой на территорию (ЭМНТ) B_{TBS} [Вт/м²], создаваемой множеством БС МС, понимается средняя территориальная плотность суммарной мощности их РЧ ЭМП, достигающей земной поверхности [2, 3]. Поскольку главные лепестки диаграмм направленности антенн БС, как правило, наклонены вниз под углом к горизонту, и основная часть излучаемой мощности БС достигает земной поверхности, в качестве ЭМНТ, создаваемой множеством БС, может быть принята средняя суммарная мощность излучений БС (сумма значений параметра TRP БС, определенного в CEPT Report 67, 2018 (р. 17), приходящаяся на 1 м² территории [4]:

$$B_{TBS} = \frac{\sum_{k=1}^K P_{ek}}{S} \approx \frac{\sum_{k=1}^K TRP_k}{S}, \quad P_{ek} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta_m} P_k(\beta, \alpha) \sin(\beta) d\beta d\alpha, \quad \beta_m \leq \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где K – число БС, распределенных равномерно по площади S ; P_{ek} – часть мощности излучения k -й БС, излучаемая ее антенной в телесном угле $\Omega \leq 2\pi$, охватывающем территорию S , за вычетом антенно-фидерных потерь; $P_k(\beta, \alpha)$ – мощность, излучаемая антенной этой БС в направлении (β, α) ; β_m – максимальный угол в вертикальной плоскости, соответствующий горизонту (граница зоны облучения); TRP_k – полная мощность излучения k -й БС.

4. Под средней ЭМНТ B_{TUE} [Вт/м²], создаваемой множеством периферийных устройств мобильных станций, понимается средняя территориальная плотность суммарной мощности их излучений. При равномерном случайном территориальном распределении и ненаправленности излучений ПУ $B_{TUE} = \rho_{UE} P_{eUE}$ (ρ_{UE} – средняя территориальная плотность излучающих ПУ, ПУ/м²; P_{eUE} – средняя мощность излучения ПУ) [3, 5].

5. Под территориальной плотностью S_{tr} [бит/с/м²] мобильного трафика информационного обслуживания понимается объем нисходящего трафика по радиоканалам БС, приходящийся на единицу площади территории [6].

6. Интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ [Вт/м²], создаваемая БС в точке наблюдения вблизи земной поверхности, расположенной случайно по отношению к БС на некоторой высоте h , соответствующей высоте человеческого роста, определяется соотношениями [2, 4]:

$$Z_{\Sigma BS} = Z_{\Sigma BS1} + Z_{\Sigma BS2} \approx \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{4\sqrt{eh}}{\lambda} \right) \approx \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{6,6h}{\lambda} \right), \quad h \geq \frac{\lambda}{4}; \quad (3)$$

$$Z_{\Sigma BS1} = \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{4h}{\lambda} \right); \quad Z_{\Sigma BS2} = \frac{B_{TBS}}{4}, \quad (4)$$

где $Z_{\Sigma BS1}$ – составляющая интенсивности ЭМФ, создаваемая БС из ближней зоны (брейкпоинт-окрестности [7]) ТН, для которых условия распространения радиоволн (РРВ) в ТН могут быть приняты соответствующими свободному пространству, при которых напряженность РЧ ЭМП,

создаваемая БС в ТН, обратно пропорциональна расстоянию R между ними; $Z_{\Sigma BS2}$ – составляющая интенсивности ЭМФ, создаваемая БС из дальней зоны или из-за пределов брейкпоинт-окрестности ТН, для которых характерно многолучевое РРВ в ТН, при котором напряженность РЧ ЭМП базовых станций в ТН обратно пропорциональна R^2 [7].

7. Интенсивность ЭМФ, создаваемая ПУ [3–5]:

$$Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma UE1} + Z_{\Sigma UE2} \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{8\pi\sqrt{eh^2}}{\lambda^2} \right) \approx \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{13,2\pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}; \quad (5)$$

$$Z_{\Sigma UE1} = \frac{B_{TUE}}{2} \ln \left(\frac{8\pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad Z_{\Sigma UE2} = \frac{B_{TUE}}{4}. \quad (6)$$

Знаки « \approx » в (3) и (5) отражают то обстоятельство, что использованная при их выводе модель РРВ [7] является моделью «наихудшего случая», отражая лишь основные закономерности процессов РРВ вблизи подстилающей поверхности, и ее точность при применении в конкретных ситуациях ограничена. Соотношение (5) получено в предположении, что ближняя зона электромагнитных излучений ПУ, в которой модель РРВ неадекватна [7], определяется окрестностью ПУ радиусом $\lambda/2$ (что соответствует известному ограничению $2D^2/\lambda$ для полуволнового вибратора длиной $D = \lambda/2$), и попадание ТН в нее исключается.

Оценки (3) и (5) не являются оценками средних значений в строго математическом смысле, хотя бы в силу пессимистического характера модели РРВ [7] и некоторого произвола в определении границ ближней (реактивной) и дальней зон излучения при выводе (5). Поэтому далее оценки (3) и (5) будем полагать условными средними значениями, что не уменьшает их практической значимости, подтверждаемой их частичной верификацией [8].

Отношение слагаемых ЭМФ (3) и (5), как и отношение их частотно-зависимых компонент $Z_{\Sigma BS1}$ и $Z_{\Sigma UE1}$, будет зависеть от длины волны λ , высоты точки наблюдения над земной поверхностью h , а также от соотношения ЭМНТ, создаваемой БС и ПУ. Компоненты ЭМФ дальней зоны и для БС, и для ПУ не зависят от частоты и определяются только создаваемой ими средней ЭМНТ в этой части территории, окружающей ТН.

Анализ (3), (5) требует предварительных оценок (прогноза) ЭМНТ B_{TBS} и B_{TUE} , создаваемой на рассматриваемой территории множеством БС и ПУ. Эти оценки могут быть выполнены как на основе анализа характеристик излучения и территориального распределения БС и ПУ (см. пп. 3, 4), так и на основе оценки (прогноза) общепринятой интегральной системной характеристики беспроводного информационного обслуживания территории – средней территориальной плотности S_{tr} мобильного трафика.

8. При равномерном распределении периферийных устройств – получателей информации по территории, если каждое ПУ принимает поток со скоростью v [бит/с], средняя территориальная плотность мобильного трафика S_{tr} (параметр АТС (area traffic capacity) в [6]) по прямым каналам БС запишется как $S_{tr} = \rho_{UE}v$, и средняя ЭМНТ, создаваемая БС, составит [4, 9]

$$B_{\Sigma BS} \approx \frac{8\pi^2 k T_0 m K_N K_S L_P SNIR (K_{CC} + 1) R_{\max}^2 S_{tr}}{\lambda^2 G_0 \log_2(1 + SNIR)}, \quad CNIR = (2^{m S_{ER}} - 1), \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура окружающей среды, $T_0 = 290$ К; m – отношение потенциальной и реальной спектральной эффективности радиоканалов, $m \geq 1$ (при использовании технологии ММО возможно $m \leq 1$); K_N – коэффициент шума радиоприемника; K_S – коэффициент необходимого запаса в уровне сигнала, принимаемого ПУ (от 1–3 в пикосайтах (хотспотах) до 10–100 в макросайтах) для реализации системообразующих функций (хендовера и др.); L_P – необходимый запас (до 10^3 – 10^4) на преодоление дополнительных по отношению к свободному пространству потерь при РРВ от БС к ПУ, связанных с затуханием радиоволн при входе в здания, их замираниями в «каньонах» городской застройки и другими факторами [7, 11]; K_{CC} – коэффициент, характеризующий создаваемое превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума; R_{\max} – радиус зоны обслуживания (сайта) БС; S_{ER} – спектральная эффективность радиоканалов БС, бит/с/Гц; G_0 – системный параметр направленности излучения БС к поверхности, примерно равный коэффициенту направленного действия (КНД) антенны БС [10].

Соотношение (7) получено при условии, что на входе радиоприемника ПУ присутствует сигнал минимально необходимого уровня, соответствующего необходимому значению защитного отношения $SNIR$ («сигнал/(шум + внутрисетевая помеха)»). Величина K_{CC} в (7) определяется качеством частотно-пространственного планирования радиосети и может принимать значения в широких пределах от 0 (внутрисетевая помеха отсутствует) до 100–1000 (при недостаточном развитии инфраструктуры радиосетей МС, низком качестве их частотно-пространственного планирования, при функционировании МС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при кластерной пространственной топологии МС также является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи).

Соотношение электромагнитной нагрузки на территорию и электромагнитного фона, создаваемых базовыми станциями и периферийными устройствами

При определении соотношения средней ЭМНТ, создаваемой БС и ПУ в зоне обслуживания МС, необходимо учитывать следующее.

- Трассы РРВ от БС к ПУ и обратно совпадают, и суммы коэффициентов усиления антенн БС и ПУ на передачу и прием на этих радиолиниях можно считать одинаковыми, несмотря на некоторые различия в частотах приема/передачи. Поэтому потери передачи для этих радиолиний, включая дополнительные потери по отношению к свободному пространству, определяемые множеством факторов [11], также могут считаться одинаковыми.

- Максимальные средние мощности излучения по радиоканалу ПУ (21–24 дБм) и внешних БС (41–49 дБм) отличаются на два порядка и более [12]. Это связано с необходимостью обеспечения радиовидимости базовой станции за пределами ее зоны обслуживания для реализации хендвера с несколько худшей чувствительностью радиоприема ПУ по сравнению с БС, а также с необходимостью обеспечения более высокой скорости передачи данных от БС к ПУ по сравнению с обратным направлением. Фактическое отношение средних мощностей излучения БС и ПУ может быть еще большим при существенной асимметрии объемов трафика по нисходящим и восходящим каналам связи и с учетом наличия регулировки мощности излучения ПУ в некоторых режимах в широких пределах. Если учесть то обстоятельство, что средняя мощность излучения БС по отдельному радиоканалу может расходоваться на обеспечение связи с несколькими ПУ (например, в одном радиоканале БС GSM происходит передача данных с временным разделением для восьми ПУ, то мощность передачи одного бита информации «вниз» на порядок и более выше, чем при передаче «вверх» ($K_S \geq 10$)). В то же время для пико-БС в помещениях (Indoor Hotspot в [12]), где хендвер не требуется, отличие мощностей излучений БС и ПУ не превышает 3 дБ.

ПУ могут группироваться, в местах концентрации ПУ их территориальная плотность может превышать средний уровень на величину $K_G = 10–100$. Отношение K_T интенсивности нисходящего и восходящего трафиков, характеризующее их асимметрию, принимает разные значения, равные единице для мобильной телефонии и достигающие 10–100 для мобильного интернета [13]. В результате средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями ПУ в окрестности некоторой ТН у земной поверхности, будет определяться соотношением

$$B_{TUE} \approx \frac{B_{TBS} K_G}{K_S K_T}. \quad (8)$$

Таким образом, интенсивность совокупного ЭМФ, образуемого излучениями и БС, и ПУ в некоторой рассматриваемой полосе частот МС, определится соотношением

$$Z_\Sigma = Z_{\Sigma BS} + Z_{\Sigma UE} = \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{4\sqrt{eh}}{\lambda} \right) + \frac{B_{TBS} K_G}{2K_S K_T} \ln \left(\frac{8\pi\sqrt{eh^2}}{\lambda^2} \right). \quad (9)$$

Соотношение (8) справедливо для традиционной кластерной структуры сетей МС с использованием обычных антенн БС со статическими секторными диаграммами направленности, при которых локальное увеличение территориальной плотности ПУ и восходящего трафика не приводит к заметному изменению пространственной структуры ЭМФ (5), создаваемого излучениями БС. Иное имеет место в сетях МС, использующих в БС активные фазированные антенные решетки (АФАР) с динамическим адаптивным формированием узких лучей в направлении на каждое обслуживаемое ПУ (АФАР Massive MIMO, режим Beamforming). В этих сетях территориальная

концентрация ПУ сопровождается соответствующим адаптивным ростом уровня АТС и интенсивности ЭМФ (5), создаваемого излучениями этих БС, что может рассматриваться как эквивалентное локальное увеличение территориальной плотности беспроводного трафика и БС ($K_G \rightarrow 1$) и делает вклад (6) излучений ПУ в местах их концентрации в суммарный уровень ЭМФ незначительным.

9. Поскольку для реализации систем и услуг 4G/5G выделено множество J (несколько десятков) полос частот в диапазонах ультравысоких, сверхвысоких и крайне высоких частот, полная интенсивность ЭМФ РЧ $Z_{\Sigma J}$, создаваемая системами МС, должна определяться суммированием $Z_{\Sigma j}$ каждой из них

$$Z_{\Sigma J} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma j}. \quad (10)$$

Вклад каждой полосы частот будет связан с соответствующими вкладами ЭМНТ B_{TBSj} и B_{TUEj} в суммарную ЭМНТ (7), (8), создаваемую всеми БС и ПУ на рассматриваемой территории, и определяться соответствующими этой полосе частот значениями параметров λ_j , S_{irj} , R_{maxj} , m_j , $SNIR_j$ (m_j , S_{ERj}), K_{Gj} , K_{Sj} , L_{Pj} , K_{CCj} , G_{0j} .

Расчетные данные и их обсуждение

Графические зависимости на рис. 2, 3 позволяют оценить степень реалистичности оценок, получаемых с использованием приведенных выше соотношений, на основании расчетных оценок уровней ЭМФ, создаваемого действующими системами МС GSM-1800 (2G).

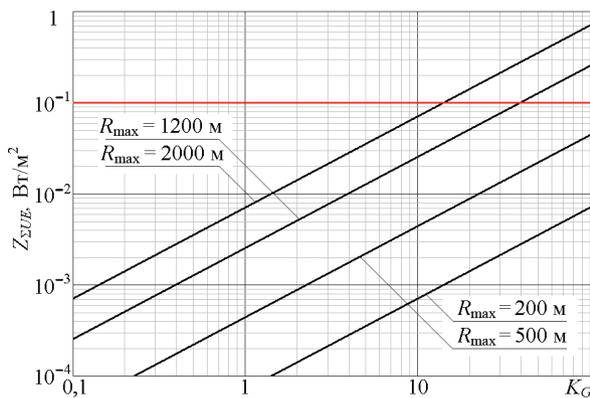


Рис. 2. Зависимости уровня электромагнитного фона, создаваемого излучениями периферийных устройств GSM-1800, от степени их группирования в окрестности точки наблюдения

Fig. 2. Dependences of the level of electromagnetic background generated by the emissions of GSM-1800 peripheral devices on the degree of their grouping in the vicinity of observation point

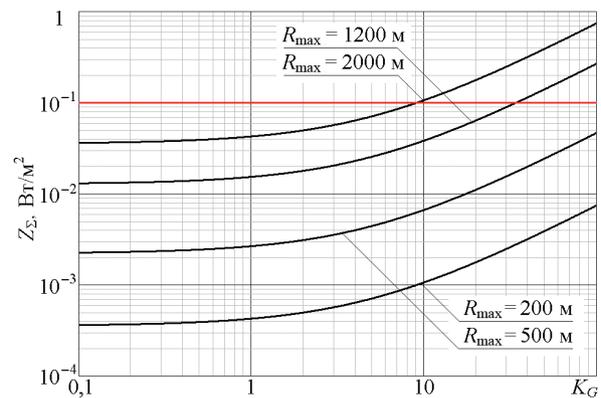


Рис. 3. Зависимости суммарного уровня электромагнитного фона, создаваемого излучениями периферийных устройств и базовых станций GSM-1800, от степени их группирования

Fig. 3. Dependences of the total level of the electromagnetic background created by the radiation of peripheral devices and GSM-1800 base stations on the degree of their grouping

На рис. 2 приведены расчетные зависимости (5) условного среднего уровня (далее – уровень) ЭМФ, создаваемого излучениями мобильных телефонов GSM-1800 ($\lambda = 0,17$ м), от степени их группирования в окрестности ТН при различных размерах сайтов сотовой радиосети, соответствующих городским микросайтам в местах с высокой плотностью населения ($R_{max} = 200$ м), микросайтам среднеэтажной городской застройки ($R_{max} = 500$ м), пригородным макросайтам ($R_{max} = 1200$ м) и макросайтам сельской местности ($R_{max} = 2000$ м). Горизонтальная линия $0,1$ Вт/м² (10 мкВт/см²) на рис. 2–5 соответствует предельно допустимому уровню РЧ ЭМП, принятому во многих странах в качестве гигиенического норматива. Расчеты выполнены при типовых значениях параметров, входящих в соотношения (7), (8): $K_S = 10$, $L_P = 10^4$, $SNIR = 100$ (20 дБ), $K_{CC} = 10$, $S_{ir} = 100$ бит/с/м², $G_0 = 50$ (17 дБ), $m = 2,42$ [9], $K_T = 1$.

При оценке степени адекватности представленных на рис. 2 данных следует иметь в виду, что АТС, создаваемая системами GSM-1800, относительно мала. Так, при территориальной плот-

ности ПУ 10^4 ПУ/км², удельной интенсивности трафика 0,05–0,08 Эрл (относительное число ПУ в активном режиме) и скорости передачи данных в канале GSM 2^{15} бит/с АТС оказывается равной всего $S_{tr} = 16\text{--}26$ бит/с/м².

Уровни АТС, создаваемые системами GSM в местах с высокой плотностью населения, не превышают 10^2 бит/с/м² и могут приближаться к 10^3 бит/с/м² только в местах массового скопления пользователей МС (бизнес- и торговые центры, стадионы и т. п.). При ухудшении качества частотно-территориального планирования сети (увеличении K_{CC} до 30–50 и более, что в сетях GSM не редкость) зависимости на рис. 2 соответственно перемещаются вверх в области $S_{tr} \leq 10^2$ бит/с/м², оставаясь несколько ниже уровня 0,1 Вт/м², что в целом согласуется с данными об уровнях ЭМФ в различных странах в периоды преобладания технологий 2G МС [8].

На рис. 3 для тех же исходных данных приведены расчетные зависимости (9) интенсивности ЭМФ, создаваемого и БС, и ПУ GSM-1800, от коэффициента группирования ПУ. Их анализ свидетельствует о том, что локальное группирование ПУ может быть причиной существенного увеличения интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, вплоть до опасного уровня, что согласуется с результатами [1] и является существенным фактором, влияющим на уровень вынужденных рисков для здоровья населения (что в настоящее время существующими системами защиты населения не учитывается).

На рис. 4 приведены расчетные зависимости (9) уровня ЭМФ, создаваемого излучением ПУ и БС пикосайтов 5G со слаборазнесенными антеннами БС ($G_0 = 5$ дБи, $R_{max} = 20$ м [14]) при $S_{tr} = 10^7$ бит/с/м², от степени группирования ПУ в окрестности ТН при различных рабочих частотах в диапазонах FR1 и FR2. Частоты 2,4 и 5,25 ГГц диапазона FR1 широко используются в действующих сетях Wi-Fi, частоты 24,25 и 52,6 ГГц соответствуют верхней и нижней границам диапазона FR2, а частота 70 ГГц рекомендована [14]. Расчеты выполнены при типовых значениях параметров, входящих в соотношения (7)–(9): $K_S = 10$, $L_P = 10$, $K_T = 10$, $SNIR = 100$ (20 дБ), $K_{CC} = 10$, $m = 1$. Линия 10 Вт/м² (1000 мкВт/см²) на рис. 4, 5 соответствует корпоративным рекомендациям ICNIRP, учитывающим лишь тепловое воздействие РЧ ЭМП на биоткани.

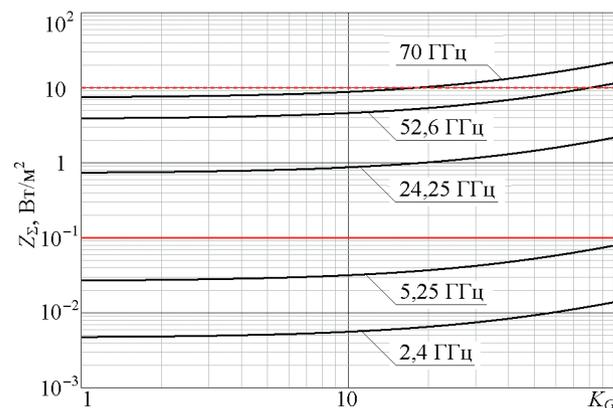


Рис. 4. Зависимости уровня электромагнитного фона, создаваемого излучениями периферийных устройств и базовых станций пикосайтов 5G ($R_{max} = 20$ м) со слаборазнесенными антеннами базовых станций, от степени их группирования

Fig. 4. Dependences of the level of electromagnetic background generated by the radiation of peripheral devices and base stations of 5G picosites ($R_{max} = 20$ m) with weakly directional base station antennas on the degree of their grouping

Анализ кривых на рис. 4 свидетельствует о том, что пространственное группирование ПУ, функционирующих в режиме передачи данных в условиях высокой плотности мобильного трафика, может быть причиной относительно небольшого увеличения суммарной интенсивности ЭМФ на 1–3 дБ, что объясняется существенной асимметрией нисходящего и восходящего трафиков. При этом использование в хотспотах рабочих частот диапазона FR1 обеспечивает их функционирование, безопасное для населения. Использование же в этих сценариях 5G рабочих частот миллиметрового диапазона в сочетании со слаборазнесенными антеннами БС хоть и является приемлемым с корпоративной точки зрения, однако представляет опасность для населения в силу того, что при $S_{tr} = 10^7$ бит/с/м², декларируемом для 5G, следует ожидать превышения предельно

допустимого уровня 10 мкВт/см^2 над уровнем создаваемого ЭМФ на один-два порядка. Из (7) следует, что безопасность хотспотов с плотностью беспроводного трафика более 10^5 бит/с/м^2 в диапазоне FR2 может быть обеспечена только за счет многоэлементных АФАР пико-БС с динамическим формированием узких лучей для каждого пользователя.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости (9) уровня ЭМФ, создаваемого излучениями ПУ и БС пикосайтов 5G ($R_{\text{max}} = 20 \text{ м}$) с АФАР миллиметрового диапазона, от плотности беспроводного трафика при рабочих частотах, соответствующих нижней и верхней границам диапазона FR2, и двух значениях КНД АФАР – $G_0 = 25$ (14 дБи) и $G_0 = 500$ (27 дБи). Расчеты выполнены при $K_G = 1$ (режим Beamforming), $K_T = 100$ и типовых значениях параметров в соотношениях (7)–(9), соответствующих рис. 4.

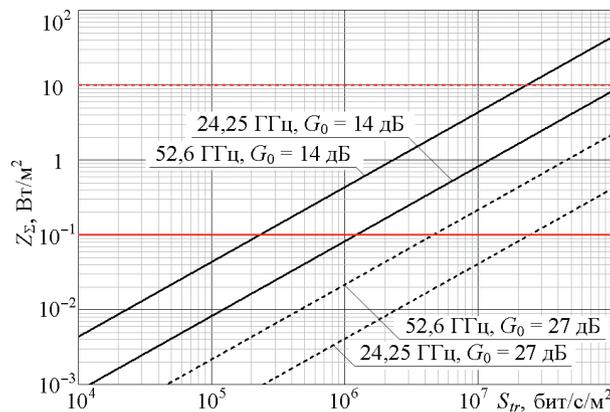


Рис. 5. Зависимости уровня электромагнитного фона, создаваемого излучениями периферийных устройств и базовых станций пикосайтов 5G с активными фазированными антенными решетками, от плотности беспроводного трафика в диапазоне FR2 при различных коэффициентах направленного действия активных фазированных антенных решеток

Fig. 5. Dependences of the level of electromagnetic background generated by the radiation of peripheral devices and base stations of 5G picosites with active phased antenna arrays on the density of wireless traffic in the FR2 range at different directivity coefficients of active phased array antennas

Анализ рис. 5 позволяет сделать вывод, что в хотспотах МС, реализуемых в соответствии со сценариями [14], достижение территориальной плотности мобильного трафика 10^7 бит/с/м^2 , декларируемой для систем 5G, при безопасных для населения средних уровнях ЭМФ возможно на рабочих частотах, соответствующих нижней границе диапазона FR2, при КНД лучей АФАР 24–27 дБи, что может быть обеспечено применением БС с многоэлементными АФАР с динамическим адаптивным формированием узких лучей в направлении на каждую обслуживаемую ПУ, а безопасная реализация этих сценариев на частотах, соответствующих верхней границе диапазона FR2, проблематична в силу необходимости обеспечения КНД лучей АФАР ≥ 30 дБи.

Заключение

1. Соотношения (5)–(10) основаны на использовании упрощенной модели системы мобильной связи, идеализированных моделей излучения и пространственного размещения базовых станций и излучающих периферийных устройств, а также на эмпирической модели распространения радиоволн наихудшего случая, отражающих лишь основные закономерности формирования радиочастотных электромагнитных полей в присутствии множества пространственно распределенных источников электромагнитных излучений. Тем не менее получаемые с их помощью оценки близки к реальности, что подтверждается зависимостями на рис. 2, 3.

2. В местах скопления пользователей мобильной связи составляющая электромагнитного фона, образуемая излучениями их абонентских терминалов мобильной телефонной связи и интернета, может оказаться преобладающей, многократно превышая интенсивность электромагнитного фона, создаваемого излучениями базовых станций и определяя фактический уровень вынужденных рисков для здоровья населения, что, по-видимому, требует учета в системе их гигиенического нормирования.

3. Реализация сценариев 5G [12, 14] в местах локального скопления пользователей мобильной связи (сценарии Indoor Hotspot) с использованием беспроводных технологий миллиметрового диапазона и слабонаправленных антенн ($G_0 = 5$ дБи) с удовлетворением действующих гигиенических ограничений невозможна, и поэтому не имеет видимых преимуществ по сравнению с использованием полос частот диапазона FR1. Безопасная реализация этих сценариев в диапазоне FR2 возможна лишь при использовании базовых станций с многоэлементными активными фазированными антенными решетками Massive MIMO в режиме Beamforming, а также при сокращении до 20 м размеров зоны обслуживания этих базовых станций (точек доступа) в соответствии с [14], ограничении уровней АТС при использовании верхней части диапазона FR2 и реализации мер системного характера, обеспечивающих уменьшение уровней соканальных помех.

Список литературы / References

1. Svistunov A. S. (2018) Estimation of Electromagnetic Background Level Created by Base and Mobile Stations of Cellular Radionetworks in Urban Area with High Density of Population. *Doklady BGUIR*. (6), 26–31 (in Russian).
2. Mordachev V. I. (2012) Terrestrial Electromagnetic Loading Created by Electromagnetic Radiations of Cellular Base Stations. *Doklady BGUIR*. (6), 116–123 (in Russian).
3. Mordachev V. I. (2012) Electromagnetic Filling on the Territory, Created by User's Stations of Cellular Communications. *Doklady BGUIR*. (7), 25–33 (in Russian).
4. Mordachev V. (2021) Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on "EMC APEMC 2021", Bali-Indonesia, Sept. 27–30*. 37–40.
5. Mordachev V. (2017) System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near-Field Zone Limitations of their Antennas. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2017", Angers, France, Sept. 4–8*. (64), 6.
6. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. *Rec. ITU-R. M.2083*.
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*.
8. Mordachev V. (2020) Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2020", Rome, Italy, Sept. 23–25*.
9. 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 (in Russian).
10. Mordachev V. I., Tsyanyan D. A. (2022) Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Created by Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 56–64.
11. The Concept of Transmission Loss for Radio Links. *Rec. ITU-R.341*.
12. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced. *Rep. ITU-R M.2135*.
13. *Ericsson Mobility Reports. 2011–2022*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports> (Accessed 11 October 2022).
14. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020. *Report ITU-R M.2412*.

Сведения об авторе

Мордачев В. И., к. т. н., доцент, вед. сотрудник научно-исследовательской лаборатории электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. 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. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Research Laboratory of Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment of R&D Department of the 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