

## РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ СИСТЕМАМИ МОБИЛЬНОЙ (СОТОВОЙ) СВЯЗИ

© 2024 г. В. И. Мордачев\*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники Минск, Беларусь*

\*E-mail: [mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)

Поступила в редакцию 25.12.2023 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Излагается методика интегральной оценки интенсивности радиочастотного электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого беспроводными информационными службами, на основе прогноза средней электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой излучениями пространственно-распределенных базовых станций и оконечных устройств мобильной связи. Эта нагрузка может быть определена как на основе прямой оценки средней суммарной мощности облучения земной поверхности базовыми станциями либо средней суммарной мощности излучений оконечных устройств, приходящейся на единицу ее площади, так и на основе оценки средней территориальной плотности мобильного трафика и известных параметров оборудования и топологии сетей мобильной связи. Приводятся уравнения для оценки условных средних уровней ЭМФ, создаваемого стационарными и мобильными компонентами систем мобильной связи, и результаты расчетов, иллюстрирующие процессы его формирования этими системами в различных диапазонах частот при различной средней территориальной плотности мобильного трафика и различных размерах зон обслуживания базовых станций. Эти расчеты подтверждают реальную опасность недопустимого снижения уровня электромагнитной безопасности населения и ухудшения экологии среды обитания без введения научно обоснованных ограничений на характеристики систем и услуг мобильной связи.

**Ключевые слова:** мобильная связь, 4G, 5G, 6G, электромагнитный фон, электромагнитная безопасность, электромагнитная экология, электромагнитная нагрузка на территорию, территориальная плотность трафика

**DOI:** 10.31857/S0869803124030074, **EDN:** MBCFNX

Радиочастотные электромагнитные поля (ЭМП РЧ), создаваемые многочисленными системами беспроводного информационного обслуживания современного общества (радиосвязи, эфирного вещания и телевидения, радиолокации, радионавигации и т.п.), являются главным фактором, определяющим антропогенное электромагнитное (ЭМ) загрязнение среды обитания, особенно заметное в местах с высокой плотностью и деловой активностью населения. Очень интенсивное развитие систем и экспансия услуг мобильной связи (МС), их все более глубокое проникновение во все сферы человеческой деятельности превратили ЭМП МС в главный фактор, определяющий обострение проблемы ЭМ безопасности населения.

Результаты [1–12 и др.] многочисленных экспериментальных исследований ЭМ фона (ЭМФ), создаваемого преимущественно системами МС второго и третьего поколений (2G/3G)

в десятках стран, свидетельствуют о том, что его уровни даже до начала активного внедрения технологий и систем МС четвертого (4G) и пятого (5G) поколений приблизились к предельно допустимым (ПДУ) 2.5...10 мкВт/см<sup>2</sup>, принятым во многих странах в качестве гигиенических нормативов с учетом опасности отдаленных последствий “нетепловых” эффектов воздействия ЭМП РЧ на здоровье населения.

Отсутствие во многих странах столь жесткого гигиенического нормирования ПДУ ЭМП РЧ определяется не недооценкой опасности ЭМФ РЧ для населения, а различными подходами к его защите [13, 14]: ориентация на “тепловые” нормативы [15], фактически определяющие границу интенсивности ЭМП РЧ, превышение которой способно вызвать необратимое физическое разрушение биоткани, предполагает наличие эффективной судебной защиты населения от ЭМП РЧ, создаваемых системами МС. Эффективность

подобной “пассивной” защиты населения от воздействия ЭМФ РЧ в условиях интенсивного развития систем и внедрения услуг МС 4G/5G поставлена под сомнение на правительственном и высшем судебном уровне ряда стран [16–19], а также многими ведущими специалистами [20, 21 и др.].

Эволюция МС 4G→5G→6G, сопровождающаяся увеличением на несколько порядков средней пространственной плотности источников ЭМП (с  $10^3$ – $10^4$  до  $10^6$ – $10^7$  ед/км<sup>2</sup>), значительным расширением верхней границы диапазона частот МС (с 2–3 до 50–100 ГГц и выше) и ростом средней территориальной плотности мобильного (беспроводного) трафика (с  $10^3$ – $10^4$  до  $10^7$ – $10^9$  бит/с/м<sup>2</sup>) [22–29], безусловно, чревата представляющим большую опасность недопустимым ЭМ загрязнением среды обитания. Единственный способ избежать этой опасности состоит в эффективном научно обоснованном управлении процессами развития и внедрения МС 4G/5G/6G, обеспечивающем ее безопасность для населения при сохранении ее высокой эффективности и привлекательности. Такое управление невозможно без практической методики объективной количественной оценки интенсивности ЭМФ, сопутствующего реализации всего множества сценариев и беспроводных услуг 4G/5G/6G.

Прямой расчет интенсивности ЭМФ, создаваемого множеством ЭМ излучений стационарных базовых станций (БС) и подвижных/стационарных периферийных устройств (ПУ) МС, невозможен в силу огромного числа источников ЭМП РЧ и априорной неопределенности исходных данных. Автором предложена альтернативная методика [30–43] ее интегральной оценки у земной поверхности на основе анализа системных характеристик сетей МС – средней ЭМ нагрузки на территорию (ЭМНТ), создаваемой множеством БС и ПУ на рассматриваемой территории.

Цель данной работы – систематическое изложение основных положений данной методики в интересах преодоления существующего крайне опасного пробела в методах и средствах оценки ожидаемого уровня ЭМ загрязнения среды обитания в условиях экспансии 4G/5G/6G.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

1. Базовая модель пространственного размещения БС и ПУ систем МС приведена на рис. 1. В этой модели

- ПУ представляют собой абонентские устройства МС, располагаемые у головы либо у верхней части тела человека, однако в качестве ПУ могут рассматриваться любые периферийные устройства, высота которых  $H_{UE}$  над земной поверхностью соответствует высоте точки наблюдения (ТН), располагаемой на высоте  $H_{OP} = 1$ – $2$  м (в пределах человеческого роста);

- высоты  $H_{BS}$  антенн БС над земной поверхностью существенно превышают высоты размещения над поверхностью ПУ и ТН:  $H_{BS} \gg H_{OP} \approx H_{UE}$ . При сотовой структуре радиосети радиус  $R_{max} \gg H_{BS}$  зоны обслуживания БС соответствует размерам соты (зоны обслуживания БС);

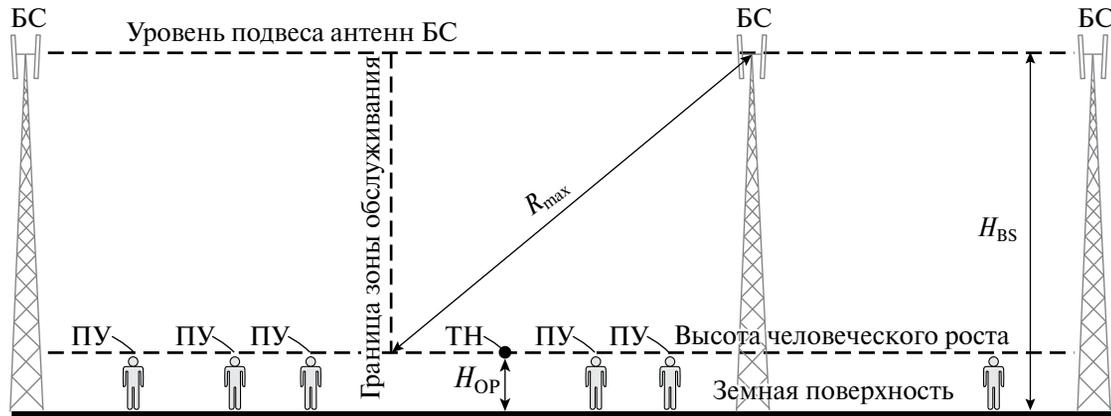
- координаты ТН, в которой анализируется ЭМФ, выбираются случайно, так что распределение БС и ПУ по территории относительно ТН можно считать случайным равномерным со средними плотностями  $\rho_{BS}$  [БС/м<sup>2</sup>] и  $\rho_{UE}$  [ПУ/м<sup>2</sup>].

2. Интенсивность  $Z_S$  [Вт/м<sup>2</sup>] ЭМФ в ТН определяется в виде скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) ЭМП РЧ, создаваемых множеством  $N$  их источников, расположенных в зоне радиовидимости из ТН:

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

где  $Z_0$  – порог радиовидимости, соответствующий, например, порогу чувствительности радиоприема в системах радиомониторинга ЭМ обстановки (ЭМО). Поскольку в силу известных свойств ЭМО, создаваемой пространственно распределенными источниками, ЭМП РЧ, величина  $Z_S$  определяется лишь небольшим числом преобладающих слагаемых в (1), выбор значения  $Z_0$  слабо влияет на оценки (1) при  $N > 10$  [30–32].

3. Под средней ЭМНТ  $B_{BS}$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемой множеством  $N$  БС МС на некоторой территории площадью  $S$ , понимается средняя территориальная плотность суммарной мощности их ЭМП РЧ, достигающей земной поверхности [33, 35, 42]. Поскольку главные лепестки диаграмм направленности антенн БС, на которые приходится основная часть энергии их ЭМП, как правило, направлены вниз для обеспечения радиосвязи с распределенными по территории ПУ, в качестве ЭМНТ, создаваемой БС, может быть



**Рис. 1.** Пространственное размещение периферийных устройств (ПУ) и антенн базовых станций (БС) мобильной связи относительно ТН.

$H_{OP}$  – высота точки наблюдения (ТН) и ПУ над земной поверхностью,  $H_{BS}$  – высота фазовых центров антенн БС над земной поверхностью,  $R_{max}$  – радиус зоны обслуживания БС (максимальная дальность связи).

**Fig. 1.** Spatial placement of base stations (BS) and users equipment (ПУ) of mobile communications relative to the observation point (ТН).

$H_{OP}$  – height of ТН and ПУ above the earth's surface,  $H_{BS}$  – height of phase centers of BS antennas above the earth's surface,  $R_{max}$  – radius of the BS service area (maximum communication range).

принята средняя суммарная мощность излучений  $N$  БС (значений  $P_{TRPn}$  “Total radiated power” (TRP) БС, определенного в [45]), приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  территории:

$$B_{BS} = \frac{\sum_{n=1}^N P_{en}}{S} \approx \frac{\sum_{n=1}^N P_{TRPn}}{S}, \quad n \in [1, N], \quad (2)$$

где  $P_{en} \approx P_{TRPn}$  – часть мощности  $n$ -й БС, излучаемой ее антенной в телесном угле  $\Omega \leq 2\pi$ , охватывающем облучаемую поверхность  $S$ , за вычетом антенно-фидерных потерь. Прямая связь между (1) и (2) носит фундаментальный характер хотя бы в силу совпадения их единиц измерений.

4. ЭМ излучения ПУ принято считать ненаправленными; создаваемая ими средняя ЭМНТ  $B_{UE}$  [Вт/м<sup>2</sup>] соответствует средней территориальной плотности суммарной мощности их излучений:

$$B_{UE} = \rho_{UE} P_{UE}, \quad (3)$$

где  $P_{UE}$  [Вт] – средняя мощность излучения ПУ, для режима мобильной (сотовой) телефонной связи в среднем составляющая примерно 30–50% от максимальной [31, 34, 46, 47 и др.]

но достигающая максимума в режиме передачи данных (мобильный интернет) для обеспечения максимальной скорости (спектральной эффективности) передачи данных.

5. Модель распространения радиоволн (РРВ). При оценке интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями территориально распределенных БС, целесообразно использовать верхнюю ветвь широко используемой модели РРВ ([48], формула (2)), отражающую пессимистический (с точки зрения ЭМ загрязнения среды обитания) характер затухания радиоволн при их РРВ в ТН от ближайших БС в условиях городской застройки:

$$Z = \begin{cases} \frac{P_e}{4\pi R^2} & R \leq R_{BP}; \\ \frac{R_{BP}^2 P_e}{4\pi R^4} & R > R_{BP}; \end{cases} \quad R_{BP} = \frac{4H_{OP}H_{BS}}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $Z$  [Вт/м<sup>2</sup>] – ППМ ЭМП, создаваемая в ТН излучением БС с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ)  $P_e$  [Вт], удаленной от ТН на расстояние  $R$  [м];  $\lambda$  [м] – длина волны ЭМ излучения БС;  $R_{BP}$  – расстояние “брейк-пойнт”, по мере удаления на которое от ТН происходит изменение характера РРВ между БС и ТН. Для  $R \leq R_{BP}$  характерны условия

РРВ в свободном пространстве, при  $R > R_{BP}$ ) условия РРВ определяются интерференцией прямого и отраженного от поверхности лучей. Модель (4) адекватна и для РРВ между ТН и ПУ, в этом случае  $R_{BP} = 4H_{OP}H_{UE}/\lambda$ .

6. Для функционирования систем МС 4G/5G выделено несколько десятков полос частот в диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ [23–27]. В связи с тем, что ширина каждой из них не превышает 5–10% от ее центральной частоты (2.7% для GSM-900, 4.2% для GSM-1800, 2.8% для UMTS, менее 5% для каждой из полос частот LTE), анализ закономерностей, касающихся формирования ЭМФ РЧ излучениями систем МС, может выполняться для некоторых фиксированных длин волн, соответствующих этим полосам частот.

7. Методика определения средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС в отдельно взятой полосе частот МС ( $\lambda \approx const$ ) предполагает ее оценку в форме произведения среднего значения ППМ ЭМП БС и их числа в ТН [31, 33, 36].

Использование модели случайного равномерного распределения БС по территории всей области радиовидимости со средней плотностью  $\rho_{BS}$  и модели РРВ (4) позволяет, используя подход [31], получить ряд соотношений, приведенных ниже.

А. Плотность распределения вероятностей (п.р.в.) расстояния  $R$  от ТН до БС, находящихся в области свободного РРВ в ТН:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{BP}^2},$$

$$H_{BS} - H_{OP} \leq R \leq R_{BP},$$

$$H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}.$$

Б. П.р.в. значений ППМ ЭМП БС из области свободного РРВ в ТН в рассматриваемой полосе частот МС и их математическое ожидание  $m_{11}(Z)$ :

$$w(Z) = \frac{Z_{BP}Z_{max}}{(Z_{max} - Z_{BP})Z^2} \approx \frac{Z_{BP}}{Z^2},$$

$$Z_{BP} \leq Z \leq Z_{max}, \quad Z_{BP} \ll Z_{max};$$

$$Z_{BP} = \frac{P_e}{4\pi R_{BP}^2},$$

$$Z_{max} = \frac{P_e}{4\pi(H_{BS} - H_{OP})^2} \approx \frac{P_e}{4\pi H_{BS}^2};$$

$$m_{11}(Z) \approx \frac{P_e \lambda^2}{32\pi H_{BS}^2 H_{OP}^2} \ln\left(\frac{4H_{OP}}{\lambda}\right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}.$$

В. Среднее число  $N_{1AVBS}$  БС в области свободного РРВ и средняя интенсивность  $Z_{\Sigma 1BS}$  ЭМФ РЧ, создаваемого ими в ТН при изотропности их излучений и равенстве их ЭИИМ:

$$N_{1AVBS} = \rho_{BS} \pi R_{BP}^2 = \frac{16\pi \rho_{BS} H_{OP}^2 H_{BS}^2}{\lambda^2};$$

$$Z_{\Sigma 1BS} = N_{1AVBS} m_{11}(Z) = \frac{B_{BS}}{2} \ln\left(\frac{4H_{OP}}{\lambda}\right),$$

$$B_{BS} = \rho_{BS} P_e, \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4},$$

где  $B_{BS}$  – средняя удельная ЭМНТ, создаваемая излучениями БС в брейкпойнт-окрестности ТН радиуса  $R_{BP}$  со свободным РРВ между БС и ТН. Принципиально важным обстоятельством является зависимость  $Z_{\Sigma 1BS}$  не от значений ЭИИМ отдельных БС, а от интегрального параметра – создаваемой ими средней ЭМНТ  $B_{BS}$ , что существенно упрощает дальнейший анализ интенсивности ЭМФ, поскольку при равномерном территориальном распределении множества БС с различной ЭИИМ в окрестности ТН средняя интенсивность создаваемого ими ЭМФ определяется суммарной средней ЭМНТ, создаваемой всем этим множеством БС.

Г. П.р.в. расстояния  $R$  от ТН до БС, для которых  $R > R_{BP}$ :

$$w(R) = \frac{2R}{(R_{RV}^2 - R_{BP}^2)},$$

$$R_{BP} \leq R \leq R_{RV} = \left(\frac{R_{BP}^2 P_e}{4\pi Z_0}\right)^{\frac{1}{4}} = a R_{BP}, \quad a \gg 1.$$

Д. П.р.в. значений ППМ ЭМП БС из области интерференционного РРВ в ТН и их математическое ожидание  $m_{12}(Z)$  в ТН при изотропности их излучений и равенстве их ЭИИМ:

$$w(Z) = \frac{\sqrt{Z_{BP}Z_0}}{2Z^{3/2}(\sqrt{Z_{BP}} - \sqrt{Z_0})} \approx \frac{\sqrt{Z_0}}{2Z^{3/2}},$$

$$Z_0 \leq Z \leq Z_{BP}, \quad Z_0 \ll Z_{BP};$$

$$m_{12}(Z) \approx \sqrt{Z_{BP}Z_0} = \frac{P_e}{4a^2\pi R_{BP}^2}.$$

Е. Среднее число  $N_{2AVBS}$  БС в области интерференционного РРВ ( $R > R_{BP}$ ) и средняя интенсивность  $Z_{\Sigma 2BS}$  ЭМФ, создаваемого ими в ТН:

$$N_{2AVBS} = \rho_{BS} \pi (R_{RV}^2 - R_{BP}^2) = \rho_{BS} \pi R_{BP}^2 (a^2 - 1) =$$

$$= \frac{16\pi\rho_{BS} (a^2 - 1) H_{OP}^2 H_{BS}^2}{\lambda^2};$$

$$Z_{\Sigma 2BS} = \lim_{a \rightarrow \infty} (N_{2AVBS} m_{12}(Z)) = \frac{B_{BS}}{4};$$

здесь также следует отметить зависимость  $Z_{\Sigma 2BS}$  лишь от средней ЭМНТ, создаваемой множеством БС, расположенных в области интерференционного РРВ между БС и ТН, а также независимость  $Z_{\Sigma 2BS}$  от  $\lambda$  и  $H_{OP}$ .

Ж. Средняя интенсивность  $Z_{\Sigma BS}$  ЭМФ в рассматриваемой полосе частот МС ( $\lambda \approx const$ ), создаваемого в ТН множеством БС, расположенных равномерно случайно по отношению к ТН во всей области радиовидимости БС из ТН:

$$Z_{\Sigma BS} = Z_{\Sigma 1BS} + Z_{\Sigma 2BS} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left( \frac{4\sqrt{e}H_{OP}}{\lambda} \right) \approx$$

$$\approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left( \frac{6.6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

В последнем соотношении средняя суммарная ЭМНТ  $B_{TBS}$ , создаваемая излучениями всего множества БС с различными ЭИИМ, имеет смысл средней территориальной плотности суммарной мощности их ЭМП РЧ, достигающей земной поверхности. Эта характеристика является интегральной, соответствующей определению (2) и обеспечивающей адекватность соотношений (5)–(7) применительно к анализу реальных сценариев присутствия БС

с произвольными мощностью и направленностью их излучений.

8. Средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями ПУ в отдельно взятой полосе частот МС ( $\lambda = const$ ), также определяемая в форме произведения средних значений ППМ ЭМП ПУ и их числа в ТН.

Развитие [34, 36, 38] методики, изложенной выше в п. 7, применительно к анализу ЭМ загрязнения среды обитания излучениями ПУ МС, позволило получить следующие соотношения для оценки средней интенсивности  $Z_{\Sigma UE}$  ЭМФ, создаваемого в ТН в отдельно взятой полосе частот МС множеством ПУ, распределенных по территории случайно равномерно и создающих ЭМНТ (3):

$$Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1UE} + Z_{\Sigma 2UE} \approx \frac{B_{UE}}{2} \ln \left( \frac{8\pi\sqrt{e}h^2}{\lambda^2} \right) \approx$$

$$\approx \frac{B_{UE}}{2} \ln \left( \frac{13.2 \cdot \pi h^2}{\lambda^2} \right) \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}; \quad (6)$$

$$Z_{\Sigma 1UE} = \frac{B_{UE}}{2} \ln \left( \frac{8\pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad Z_{\Sigma 2UE} = \frac{B_{UE}}{4};$$

$$H_{OP} \approx H_{UE} \approx h.$$

Выражение (6) получено в предположении, что ближняя зона ЭМ излучения ПУ, в которой модель (4) теряет неадекватность, определяется окрестностью ПУ радиусом  $\lambda/2$  (что соответствует известному ограничению  $2D^2/\lambda$  для полуволнового вибратора длиной  $D = \lambda/2$ ), и попадание ТН в эту окрестность исключается. Граница этой окрестности может рассматриваться в качестве своеобразной условной пространственной границы, разделяющей добровольные и вынужденные риски здоровью от воздействия ЭМП ПУ, располагаемых соответственно ближе либо дальше, чем  $\lambda/2$ , от тела человека.

Как и составляющая ЭМФ, образуемая излучениями БС и описываемая соотношением (5), компонента ЭМФ, образуемая в ТН излучениями ПУ, имеет 2 составляющих: частотнозависимую  $Z_{\Sigma 1UE}$ , образуемую излучениями ПУ из брейкпойнт-окрестности ТН радиуса  $R_{BP} = 4h^2/\lambda$  со свободным РРВ между ПУ и ТН, и частотнонезависимую с интенсивностью  $Z_{\Sigma 2UE}$ , образуемую излучениями ПУ из области

интерференционного РРВ между ПУ и ТН. Знаки “ $\approx$ ” в (5), (6) отражают то обстоятельство, что использованная при их выводе модель РРВ (4) является моделью “наихудшего случая”, отражая лишь основные закономерности процессов РРВ в зонах радиовидимости источников ЭМП (БС и ПУ) из ТН вблизи земной поверхности, и ее точность ограничена.

Оценки (5), (6) не являются оценками средних значений в строго математическом смысле хотя бы в силу пессимистического характера модели (4) РРВ и некоторого произвола в определении границ ближней (реактивной) и дальней зон излучения при выводе (6), потому далее оценки (5), (6) будем называть условными средними значениями, что не снижает их адекватности, доказанной на практике.

9. Средняя ЭМНТ, создаваемая системами МС, определяемая на основе анализа средней территориальной плотности мобильного трафика (параметра АТС – “Area traffic capacity” сетей МС в [22, 23]).

9.1. Определение средней ЭМНТ, образуемой излучениями БС.

Выполнение оценок интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, с использованием (5), (6) требует предварительных оценок (прогноза) ЭМНТ  $B_{BS}$  и  $B_{UE}$ , создаваемой на рассматриваемой территории множеством БС и ПУ. Эти оценки могут быть выполнены как на основе (2), (3) в результате анализа характеристик излучения и территориального распределения БС и ПУ, так и на основе оценок АТС – интегральной системной характеристики беспроводного информационного обслуживания территории – средней территориальной плотности  $S_{tr}$  [бит/с/м<sup>2</sup>] мобильного трафика. Последнее предпочтительнее при анализе ЭМФ, создаваемого системами МС новых поколений в связи со значительным разнообразием беспроводных услуг и сценариев их реализации, затрудняющих прямые оценки с использованием (2), (3).

Развитая в [39, 40, 42] методика подобной оценки средней ЭМНТ основана на использовании известной теоремы Шеннона–Хартли [49], связывающей потенциальную спектральную эффективность передачи информации с отношением мощностей сигнала и шума в канале передачи. При регулярной сотовой структуре сети и равномерном случайном распределении ПУ по территории со средней плотностью  $\rho_{UE}$  в отдельно

взятой полосе частот ( $\lambda = const$ ), если каждая ПУ принимает поток со скоростью  $V$  [бит/с], средняя АТС на земной поверхности, создаваемая излучениями БС, будет равна  $S_{tr} = \rho_{UE} \times V$  [бит/с/м<sup>2</sup>], и средняя ЭМНТ составит:

$$B_{BS} \approx \frac{8\pi^2 k T_0 m K_N K_S L_P SNIR (K_{CC} + 1) R_{max}^2 S_{tr}}{\lambda^2 G_{0BS} \log_2(1 + SNIR)}, \quad (7)$$

$$CNIR = (2^{mS_{ER}} - 1).$$

В этом соотношении, полученном при условии, что на входе радиоприемников ПУ присутствуют передаваемые БС сигналы не ниже минимально необходимого уровня, соответствующего требуемому значению  $SNIR$  (отношения мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и собственного шума приемника), присутствуют следующие параметры:

$G_{0BS}$  – системный параметр направленности излучения БС, примерно равный коэффициенту направленного действия (КНД) антенны БС [44];  $R_{max}$  – радиус зоны обслуживания (соты) БС, составляющий десятки метров для хот-спотов (фемто- и пикосот), сотни метров для городских БС и километры для сельских БС [22, 23]);

$k$  – постоянная Больцмана,  $1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К;  $K_N$  – коэффициент шума радиоприемников ПУ (типичные значения: 5...10 [22, 23]);  $T_0$  – температура окружающей среды, град. ( $T_0 = 290$  К);

$K_S$  – коэффициент, характеризующий необходимый запас по уровню принимаемого сигнала ПУ (от 1–2 в фемто- и пикосотах до  $10$ – $10^2$  в микро- и макросотах) для реализации системобразующих функций (хендовера и т.п.);

$L_P$  – 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 [50, 51];

$K_{CC}$  – коэффициент, равный отношению уровней внутрисетевой помехи и уровня собственного теплового шума радиоприемника ПУ на его входе;

$S_{ER}$  [бит/с/Гц] – реальная спектральная эффективность передачи информации

в радиоканалах БС,  $m \geq 1$  – коэффициент, характеризующий, во сколько раз реальная спектральная эффективность радиоканала ниже потенциальной (либо выше ее при использовании технологии ММО, в этом случае  $m$  может быть меньше 1).

Соотношение (7) соответствует упрощенной модели функционирования МС, отражающей основные закономерности формирования средней ЭМНТ излучениями множества БС отдельно взятой полосы частот МС и отдельно взятого иерархического уровня системы МС, пространственная топология которого определяется размером  $R_{max}$  зоны обслуживания БС. При сложной многоуровневой пространственной топологии сетей МС создаваемая ими суммарная средняя ЭМНТ определяется суммированием оценок (7) для каждого из уровней, использующих данную полосу частот.

9.2. Определение средней ЭМНТ, образуемой излучениями ПУ.

При решении этой задачи необходимо учитывать следующее:

А. Трассы РРВ от БС к ПУ и обратно совпадают, и  $K_{нд}$  антенн на передачу и на прием и у БС, и у ПУ можно считать одинаковыми при малых различиях в частотах приема/передачи в режиме частотного дуплекса (FDD) и отсутствии этих различий в режиме временного дуплекса (TDD). Поэтому рабочие частоты и потери передачи для этих трасс, включая дополнительные потери по отношению к свободному пространству, определяющие необходимость присутствия  $L_p$  в (7), также могут считаться одинаковыми.

Б. Максимальные средние мощности ЭМ излучения ПУ (21–24 дБм) и БС вне помещений (41–49 дБм) отличаются на 2 порядка и более [22, 23]. Это связано с несколько худшей чувствительностью радиоприема ПУ по сравнению с БС, асимметрией нисходящего и восходящего трафика и с необходимостью обеспечения радиовидимости БС за пределами ее зоны обслуживания для реализации хендвера (что учитывается в (7) коэффициентом  $K_S$ ).

Фактическое отношение средних мощностей излучения БС и ПУ может быть еще большим при наличии регулировки мощности излучения ПУ в некоторых режимах. 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 8 ПУ), при этом мощность передачи 1 бита информации “вниз” выше, чем при передаче “вверх”. Для БС в помещениях (Indoor Hotspot в [22, 23]), где хендвер не требуется, отличие мощностей излучений БС и ПУ не превышает 3 дБ (2 раз).

В. ПУ могут распределяться по территории неравномерно, в местах концентрации ПУ их территориальная плотность может превышать средний уровень на величину  $K_G = 10...100$ . Отношение  $K_T = K_{TD}/K_{TU}$  интенсивности нисходящего и восходящего трафика, характеризующее его асимметрию, различно для различных сервисов МС и принимает различные значения, равные 1 для мобильной телефонии и достигающие 10–100 для мобильного интернета [53]. В результате средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями ПУ в рассматриваемой полосе частот в окрестности некоторой ТН у земной поверхности, может быть оценена следующим образом

$$B_{UE} \approx \frac{B_{BS} K_G}{K_S K_T} \quad (8)$$

Это соотношение справедливо для традиционной сотовой структуры сетей МС с использованием обычных антенн 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 каждую обслуживаемую ПУ (Massive ММО, режим “Beamforming”). В этих сетях территориальная концентрация ПУ и средней АТС сопровождается соответствующим адаптивным ростом интенсивности ЭМФ (5), создаваемого излучениями этих БС, что может рассматриваться как эквивалентное локальное увеличение территориальной плотности БС для информационного обслуживания большего количества ПУ в местах их группирования. В результате  $K_G \rightarrow 1$ , что делает вклад (6) излучений ПУ в местах их концентрации в суммарный уровень ЭМФ незначительным.

10. Определение полной средней интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, на основе оценок ЭМНТ в каждой из полос частот МС.

10.1. Средняя интенсивность ЭМФ, образуемого излучениями и БС, и ПУ в отдельной  $j$ -й полосе частот, может быть определена с использованием (5)–(8):

$$Z_{\Sigma j} = Z_{\Sigma BSj} + Z_{\Sigma UEj} = \quad (9)$$

$$= \frac{B_{BSj}}{2} \left[ \ln \left( \frac{4\sqrt{eh}}{\lambda_j} \right) + \frac{K_{Gj}}{K_{Sj}K_{Tj}} \ln \left( \frac{8\pi\sqrt{eh^2}}{\lambda_j^2} \right) \right].$$

10.2. Полная средняя интенсивность ЭМФ РЧ  $Z_{\Sigma J}$ , создаваемая системами МС во всех  $J$  полосах частот, определяться суммированием вкладов  $Z_{\Sigma j}$  излучений БС и ПУ 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  $B_{BSj}$  и  $B_{UEj}$  в суммарную ЭМНТ (7)/(8), создаваемую всеми БС и ПУ на рассматриваемой территории, и определяться соответствующими этой полосе частот и уровню иерархии в структуре системы МС значениями параметров  $\lambda_j$ ,  $S_{Tj}$ ,  $R_{maxj}$ ,  $m_j$ ,  $S_{ERj}$ ,  $SNIR_j$ ,  $K_{Gj}$ ,  $K_{Sj}$ ,  $K_{Tj}$ ,  $L_{Pj}$ ,  $K_{CCj}$ ,  $G_{0BSj}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведенные выше соотношения оперируют с доступными исходными данными о характеристиках оборудования и систем МС, обеспечивая практическую возможность оценок уровней ЭМФ, создаваемого радиосетями МС на обслуживаемой территории. Адекватность данной методики применительно к МС 2G/3G (GSM/UMTS) подтверждена ее верификацией [41] с использованием опубликованных результатов многочисленных измерений ЭМФ во многих странах, а также опытом использования ее элементов в [54] при экспертизе ЭМ безопасности на социально значимых объектах.

Ниже приведены результаты расчетов с использованием (5)–(9) интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС. При их выполнении принято во внимание следующее:

1. Полосы частот для систем 5G выделяются в двух диапазонах: в диапазоне FR1 (0.41–7.125 ГГц), охватывающем полосы частот предыдущих поколений МС и полосы частот систем Wi-Fi, и в диапазоне FR2 (24.25–52.6 ГГц). с дальнейшим его расширением до 70 ГГц [23] и выше. Диапазон FR2 еще не получил широкого распространения для коммерческой эксплуатации систем 5G, но в будущем планируется его широкое использование на нижних иерархических уровнях радиосетей 5G/6G.

2. В сетях МС типовые значения максимальной дальности связи (радиуса зоны обслуживания БС)  $R_{max}$  составляют 60 м (FR1) и 20 м (FR2) для пико- и фемтосот (точек доступа внутри зданий), 200–250 м для городских микросот, 500–750 м для городских макросот, 1000–1300 м для пригородных макросот и 1500–1800 м для макросот в сельской местности [22, 23 и др.].

3. Разные иерархические уровни топологии сетей МС требуют различного запаса по уровню сигнала БС: от  $K_S = 2$ –10 в фемто- и пикосотах до  $K_S = 10$ –100 в микро- и макросотах.

4. Необходимый запас  $L_P$  по мощности излучения для преодоления дополнительных потерь при распространении радиоволн по отношению к свободному пространству достигает  $10^3$ – $10^4$  в микро- и макросотах с внешними БС [50, 51] и составляет 5–10 дБ (3–10 раз) в фемто- и пикосотах.

5. Превышение уровнем внутрисистемных помех уровня внутренних шумов приемника (коэффициент  $K_{CC}$ ) определяется качеством частотно-территориального планирования радиосети МС и может принимать значения в широких пределах от 0 (отсутствие внутрисистемных помех) до 100...1000 и даже более (при низком качестве частотно-территориального планирования; при функционировании МС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при регулярной кластерной пространственной топологии сетей МС является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи). В современных сетях МС уровень соканальных помех уменьшается прежде всего за счет значительного увеличения объема используемого радиочастотного спектра, а также за счет адаптивного частотно-территориального планирования и оптимизации сетей, использования АФАР в режиме “Beamforming” и т.п. вплоть до отказа от сотового принципа частотного планирования.

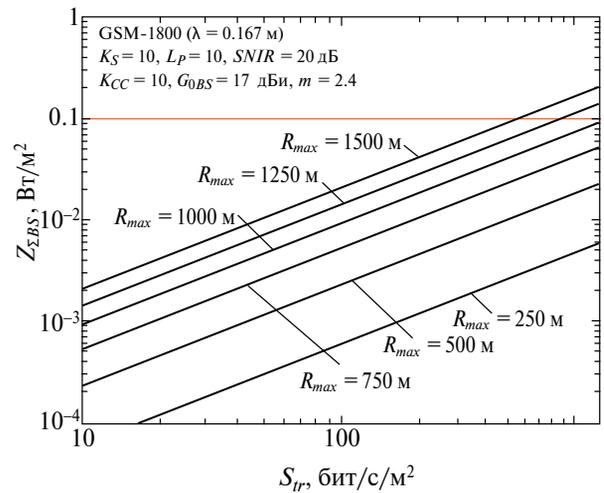
Автор при расчете демонстрационных примеров (рис. 2–6) ограничился относительно умеренным уровнем соканальных помех ( $K_{CC} = 10$ ).

6. В радиоканалах МС без использования технологии МИМО  $m \approx 2 \dots 10$  [52]. Таким образом, планируемое увеличение спектральной эффективности радиоканалов 4G/5G за счет технологии МИМО в 2–8 раз [22, 24] фактически лишь компенсирует неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования-декодирования. Поэтому оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, с использованием (7) целесообразно выполнять для  $m = 1$  в предположении, что скорость передачи данных в радиоканалах этих систем близка к потенциальной в определении [49].

7. Практический интерес с точки зрения ЭМ безопасности населения представляют оценки ЭМФ для всего множества сценариев реализации 4G/5G/6G при средней территориальной плотности мобильного трафика (АТС), достигающей декларируемых уровней  $10^5$  бит/с/м<sup>2</sup> для систем МС 4G,  $10^7$  бит/с/м<sup>2</sup> для 5G и  $10^9$  бит/с/м<sup>2</sup> для 6G [25, 28].

8. Значения  $SNIR$  и связанной с этим параметром спектральной эффективности  $S_{ER}$  (см. правую часть выражения (7)) передачи данных по радиоканалу “БС–ПУ” вблизи БС и на краю зоны обслуживания МС отличаются на 2–3 порядка [52], например, в пределах от 12–15 до 40–50 дБ. Приведенные ниже результаты оценивания интенсивности ЭМФ выполнены для типовых значений  $SNIR$ , обеспечивающих нормальное функционирование радиоканалов МС и равных 20–30 дБ ( $10^2$ – $10^3$ ) при коэффициенте  $K_N$  шума приемников ПУ 5–10 [22, 23].

Графики на рис. 2, 3, отражающие результаты [43], позволяют оценить степень реалистичности оценок с использованием (5), (6), (9). Они иллюстрируют результаты анализа уровней ЭМФ, создаваемых хорошо изученными системами GSM-1800 ( $\lambda = 0.167$  м). На рис. 2 представлены расчетные зависимости (5) условных средних значений интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого излучениями БС этих систем, от уровня АТС при различных значениях  $R_{max}$ . Горизонтальная линия  $0.1$  Вт/м<sup>2</sup> ( $10$  мкВт/см<sup>2</sup>) на этом и следующем рисунках соответствует ПДУ ЭМП РЧ, принятым во многих странах [13, 14].

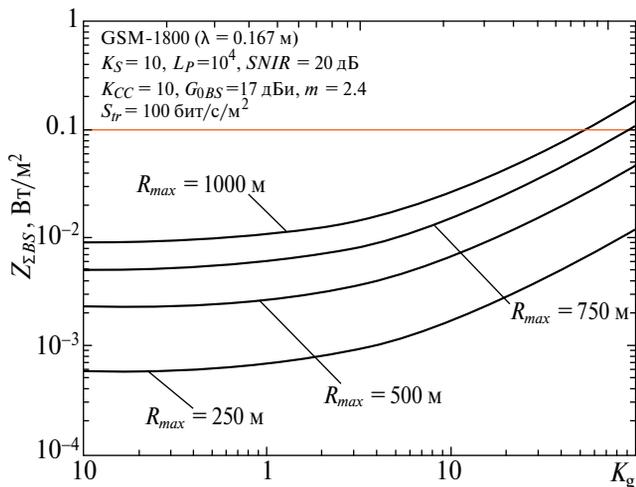


**Рис. 2.** Зависимости уровня  $Z_{\Sigma BS}$  ЭМФ, создаваемого излучениями БС GSM-1800 (2G, режим телефонной связи, симметрия нисходящего и восходящего трафика) от уровня  $S_{tr}$  АТС для различных радиусов  $R_{max}$  зоны обслуживания БС.

Символы, представленные на рис. 2–6:  $\lambda$  – длина волны,  $K_S$  – запас по уровню принимаемого сигнала ПУ для реализации системообразующих функций,  $L_P$  – запас на преодоление дополнительных потерь по отношению к свободному пространству потерь при РРВ от БС к ПУ,  $SNIR$  – отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и собственного шума приемника,  $K_{CC}$  – отношение уровней внутрисетевой помехи и уровня собственного шума радиоприемника ПУ,  $G_{0BS}$  – КНД антенны БС,  $m$  – отношение потенциальной и реальной спектральной эффективности радиоканала “БС–ПУ”.  $S_{tr}$  – средняя территориальная плотность трафика (параметр АТС),  $R_{max}$  – радиус зоны обслуживания БС.

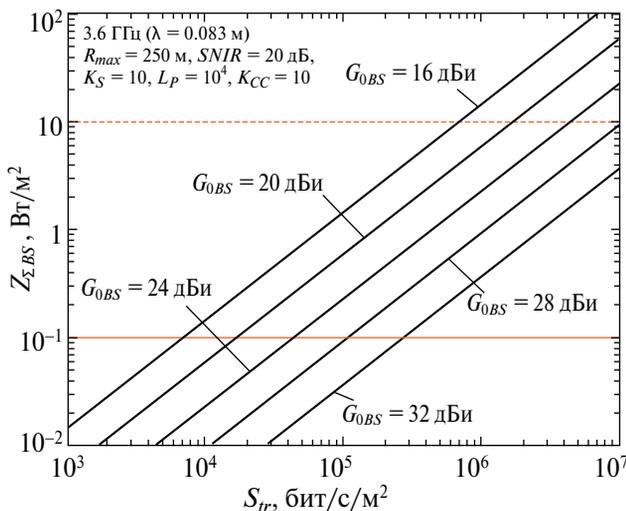
**Fig. 2.** Dependences of the EMB intensity  $Z_{\Sigma BS}$  created by radiations of the GSM-1800 БС set (2G, voice communication mode, symmetry of downlink and uplink traffic) for different radii  $R_{max}$  of БС service area, on the АТС level  $S_{tr}$ .

Symbols shown in Figures 2–6:  $\lambda$  – wavelength,  $K_S$  – margin in the level of the received signal of the ПУ for the implementation of the system-forming functions,  $L_P$  – margin for overcoming additional losses in relation to the free space propagation from БС to ПУ,  $SNIR$  – ratio of the useful signal power to the total power of interference and receiver self-noise,  $K_{CC}$  – ratio of levels of the intranetwork interference and of the own ПУ receiver thermal noise,  $G_{0BS}$  – БС antenna gain,  $m$  – ratio of the potential and actual spectral efficiency of the “БС–ПУ” radio channel,  $S_{tr}$  – average area traffic capacity (АТС),  $R_{max}$  – radius of the БС service area.



**Рис. 3.** Зависимости суммарного уровня ЭМФ, создаваемого излучениями БС ( $Z_{\Sigma BS}$ ) и ПУ ( $Z_{\Sigma UE}$ ) GSM-1800 (2G, режим телефонии, симметричность нисходящего и восходящего трафика, условия города) для различных радиусов  $R_{max}$  зоны обслуживания БС, от степени  $K_g$  наземного группирования ПУ.

**Fig. 3.** Dependences of the total EMB intensity generated by radiations of БС ( $Z_{\Sigma BS}$ ) and user’s equipment ( $Z_{\Sigma UE}$ ) in GSM-1800 network (2G, voice communication mode, symmetry of downlink and uplink traffic, urban area) for different radii of БС service area, on the degree  $K_g$  of UEs terrestrial concentration.



**Рис. 4.** Зависимости интенсивности  $Z_{\Sigma BS}$  ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских микросот 5G, от уровня  $S_{tr}$  АТС при  $m = 1$  и различных коэффициентах усиления  $G_{0BS}$  антенн БС.

**Fig. 4.** Dependences of the EMB intensity  $Z_{\Sigma BS}$  created by БС radiations of 5G urban micro-cells, on the ATC level  $S_{tr}$ , at  $m = 1$  and different БС antenna gains  $G_{0BS}$ .

При оценке степени адекватности представленных на рис. 2 данных следует иметь в виду, что АТС, создаваемая системами GSM-1800, относительно мала. Так, при территориальной плотности  $10^4$  ПУ/км<sup>2</sup>, 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  $S_{tr} = 16...26$  бит/с/м<sup>2</sup>. Уровни АТС, создаваемые системами GSM в местах с высокой плотностью населения, не превышали  $10^2$  бит/с/м<sup>2</sup> и приближались к  $10^3$  бит/с/м<sup>2</sup> только в местах массового скопления людей и интенсивного использования мобильной телефонной связи (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 рис. 2 перемещаются вверх, в области  $S_{tr} \leq 10^2$  бит/с/м<sup>2</sup> оставаясь ниже уровня 0.1 Вт/м<sup>2</sup>, что в целом согласуется с данными [1–12].

На рис. 3 для тех же исходных данных и  $S_{tr} = 10^2$  бит/с/м<sup>2</sup> приведены расчетные зависимости (9) средней интенсивности ЭМФ, создаваемого и БС, и ПУ GSM-1800, от коэффициента группирования ПУ для различных  $R_{max}$ . 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 [55] и является существенным фактором, влияющим на уровень вынужденных рисков здоровью населения (что в настоящее время существующими системами защиты населения не учитывается).

Зависимости на рис. 2, 3 наглядно иллюстрируют влияние уровней инвестиций в развитие инфраструктуры систем МС на их безопасность для населения. При одинаковом уровне АТС в сетях МС с малым количеством крупных сот уровни ЭМФ существенно выше, чем в сетях МС с большим количеством мелких сот, что обусловлено квадратичной зависимостью ЭМНТ (7) от радиуса соты  $R_{max}$  в сети МС.

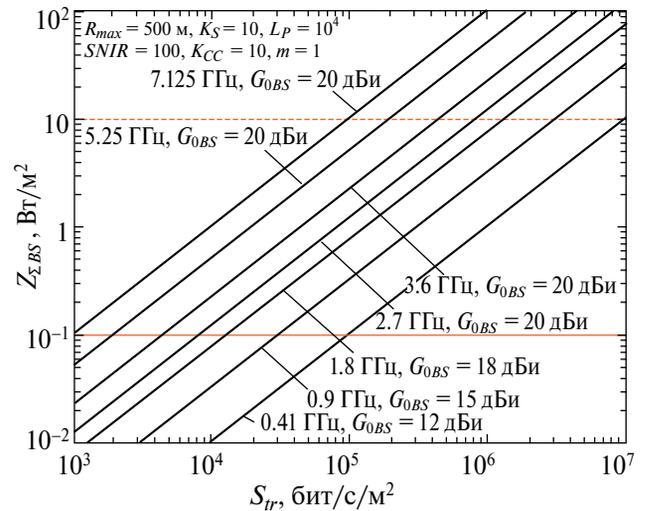
Расчетные зависимости на рис. 4–6 характеризуют ожидаемые уровни ЭМФ при различных сценариях реализации систем и услуг 4G/5G. Они отражают особенности эволюции МС 2G→3G→4G→5G, характеризуемой значительным увеличением объемов радиочастотного ресурса,

выделяемого системам МС, и возрастанием АТС на несколько порядков.

На рис. 4 приведены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских микросот с радиусом зоны обслуживания  $R_{max} = 250$  м, от территориальной плотности нисходящего трафика в нижней части диапазона СВЧ, активно используемой системами 5G, при различных коэффициентах усиления антенн БС. Два верхних графика соответствуют традиционным секторным антеннам БС и активным антенным решеткам с реализацией статической многолучевой секторной структуры (2D MIMO); три нижние кривые соответствуют использованию многоэлементных антенных решеток в режиме “Beamforming” (3D Massive MIMO). Эти зависимости свидетельствуют о потенциальном преимуществе использования в системах МС антенных решеток с большим коэффициентом усиления в узких лучах, обеспечивающих меньшие размеры “пятен” облучения земной поверхности и, следовательно, при равных уровнях АТС, обеспечивающих значительно меньшие средние уровни ЭМФ. Горизонтальная пунктирная линия  $10 \text{ Вт/м}^2$  ( $1000 \text{ мкВт/см}^2$ ) на этом и следующем рисунках соответствует корпоративным рекомендациям [15].

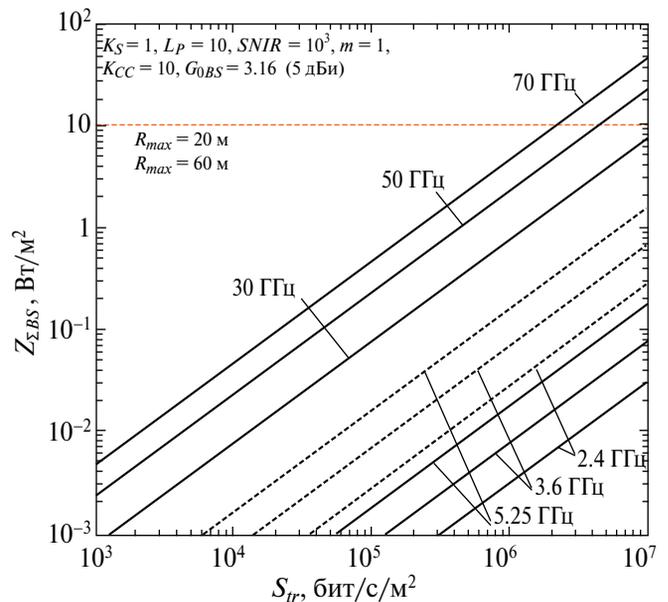
На рис. 5 представлены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских макросот ( $R_{max} = 500$  м), от АТС при использовании различных полос частот FR1, рассчитанные для типовых значений параметров, содержащихся в (7). Данные зависимости свидетельствуют о том, что реализация заявленных высокоскоростных услуг 4G/5G в городских макросотах сетей МС с использованием любых полос частот этого диапазона представляет опасность для населения; приемлемые уровни ЭМФ для АТС, соответствующей сетям 4G, могут быть обеспечены только в малых сотах (как за счет уменьшения предельной дальности связи  $R_{max}$ , так и за счет уменьшения необходимого запаса  $L_p$  мощности излучения БС).

На рис. 6 представлены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого слабонаправленными излучениями системы БС при реализации сценария (“indoor hotspot” (помещение с системой точек доступа) с параметрами пространственного размещения БС, рекомендуемыми в [22, 23]):  $R_{max} = 60$  м (4G) при использовании частотного диапазона FR1 и  $R_{max} = 20$  м (5G) при использовании частотного диапазона FR2); расчеты



**Рис. 5.** Зависимости интенсивности  $Z_{\Sigma BS}$  ЭМП, создаваемого излучениями БС городских макросот 5G, от уровня  $S_{tr}$  АТС для различных частот диапазона FR1.

**Fig. 5.** Dependences of the EMB intensity  $Z_{\Sigma BS}$  created by БС radiations of 5G urban macro-cells, on the ATC level  $S_{tr}$ , for various frequencies of FR1 range.



**Рис. 6.** Зависимости интенсивности  $Z_{\Sigma BS}$  ЭМФ, образуемого излучениями БС хотспотов 5G на различных частотах диапазона FR2 и излучениями БС хотспотов 4G (или точек доступа Wi-Fi) на различных частотах диапазона FR1, от уровня  $S_{tr}$  АТС ( $R_{max} = 60$  м – пунктирные линии,  $R_{max} = 20$  м – сплошные линии).

**Fig. 6.** Dependences of the EMB intensity  $Z_{\Sigma BS}$  created by БС radiations of 5G hotspots at various frequencies (30, 50 and 70 GHz) of FR2 range and by БС radiations of 4G hotspots (or Wi-Fi access points) at various frequencies of FR1 range, on the ATC level  $S_{tr}$  ( $R_{max} = 60$  м – dotted lines,  $R_{max} = 20$  м – solid lines).

выполнены для типовых значений параметров, входящих в (7). Нетрудно заметить, что уровни ЭМФ, создаваемые при реализации высокоскоростных услуг 5G в диапазоне FR2 при  $S_{tr} \rightarrow 10^7$  бит/с/м<sup>2</sup> с использованием слабонаправленных антенн, превышают не только “нетепловые” ПДУ ЭМП, принятые с учетом опасности отдаленных последствий их воздействия на здоровье населения, но и “тепловой” ПДУ [15]. В то же время реализация таких сценариев 5G в нижней части диапазона FR1 обеспечивает уровни ЭМФ не выше 10 мкВт/см<sup>2</sup>, а также существенно более низкие уровни ЭМФ при реализации этих сценариев в рамках 4G при  $S_{tr} \rightarrow 10^5$  бит /с/м<sup>2</sup>.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ приведенных соотношений и расчетных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Хотя соотношения (5)–(10) основаны на использовании упрощенной модели функционирования МС, идеализированных моделей излучения и пространственного размещения БС и ПУ, а также эмпирической модели РРВ наихудшего случая [48], отражающих лишь основные закономерности формирования ЭМФ в присутствии множества пространственно распределенных источников ЭМП, получаемые с их помощью оценки близки к реальности, что подтверждается зависимостями на рис. 2, 3 и результатами [41] частичной верификации изложенной методики.

2. Графические расчетные зависимости на рис. 3, согласующиеся с результатами [55], свидетельствуют о том, что при традиционной сотовой структуре сетей МС с использованием антенн БС со статичными секторными диаграммами направленности вклад излучений ПУ в совокупную интенсивность ЭМФ при их пространственном группировании может быть соизмерим со вкладом излучений БС и даже превышать его, что требует учета при анализе вынужденных рисков для здоровья населения в этих условиях.

3. Зависимости на рис. 4 свидетельствуют о том, что повышение пространственной избирательности излучений БС, сопровождающееся сужением лучей АФАР и ростом КНД, является положительным фактором, способствующем существенному уменьшению их вклада в уровень суммарного ЭМФ как за счет уменьшения доли излучаемой мощности БС, расходуемой на

сопутствующее облучение подстилающей поверхности, так и за счет уменьшения уровня внутрисетевых помех, обеспечивающего улучшение чувствительности радиоприема и соответствующего снижения необходимой мощности излучений БС.

4. Зависимости на рис. 5, 6 характеризуют ожидаемые средние уровни ЭМФ при реализации типовых вариантов и сценариев 5G, их анализ свидетельствует о следующем:

4.1. Безопасные уровни ЭМФ в сетях МС при радиусах сот в сотни метров и  $S_{tr} = 10^4$ – $10^5$  бит/с/м<sup>2</sup> (уровни АТС в сетях 4G) возможны только с использованием полос частот в нижней части диапазона FR1, менее всего подходящей для этого из-за относительной узкополосности радиоканалов диапазона УВЧ. Использование же полос частот нижней части диапазона СВЧ для безопасной генерации мобильного трафика этой плотности требует как существенного уменьшения дальности связи ( $R_{max}$ ), так и значительного увеличения пространственной избирательности излучений БС (увеличением  $G_{0BS}$  за счет применения многоэлементных АФАР).

4.2. Расширение объема выделяемого системам МС радиочастотного спектра в верхнюю часть диапазона СВЧ и в нижнюю часть диапазона КВЧ значительно снижает остроту проблемы внутрисистемных помех, ухудшающих чувствительность радиоприема; обеспечивает возможность расширения полос частот и увеличения пропускной способности радиоканалов, а также реализации компактных многоэлементных адаптивных многолучевых АФАР с большими КНД. Однако

а) в связи с пропорциональным ростом затухания радиоволн с уменьшением их длины волны реализация сценариев 5G “Indoor Hotspot-eMBB” [23] (сверхширокополосная мобильная связь в помещениях) в диапазоне FR2 со слабонаправленными антеннами ( $G_{0BS} = 5\text{dBi}$ ) оказывается опасной для населения уже при  $S_{tr} > 10^4$ , и даже применение многоэлементных АФАР в режиме “beamforming” позволяет сдвинуть эту границу всего на порядок, хотя реализация этих сценариев в полосах частот диапазона FR1, используемых современными сетями Wi-Fi оказывается безопасной практически при любых уровнях АТС, декларируемых для 5G;

б) распространение технологий и услуг 5G на диапазон миллиметровых радиоволн лишь

на основе заверений [15] об их безопасности без глубоких и независимых исследований их воздействия на человеческое здоровье крайне опасно как в силу возрастания интенсивности ЭМФ по мере продвижения рабочих частот БС пикосот к верхней границе диапазона FR2 (верхние графики на рис. 6), так и в связи с существованием известных резонансных эффектов [56, 57] при воздействии ЭМП диапазона FR2 на человеческий организм.

5. Зависимости на рис. 4–6 позволяют обоснованно комментировать существующее мнение о том, что АФАР БС 4G/5G представляют опасность для населения. Рост АТС на много порядков сопровождается увеличением ЭИИМ в главных лучах диаграмм направленности АФАР БС до 50–100 кВт, т.е. примерно на 2 порядка по сравнению с ЭИИМ БС 2G/3G, и значительным увеличением пространственной плотности БС (не менее чем на 1–2 порядка для достижения  $S_{ir} \rightarrow 10^7$  бит/с/м<sup>2</sup>). Применение антенных решеток со статической секторной многолучевой диаграммой направленности (2D MIMO), коэффициенты усиления в лучах которых мало отличаются от коэффициентов усиления традиционных секторных антенн БС, не в состоянии компенсировать влияние этого увеличения ЭИИМ и пространственной плотности БС на увеличение интенсивности ЭМФ, даже несмотря на использование импульсного режима TDD, обеспечивающего существенное снижение уровней внутрисетевых помех (параметра  $K_{CC}$  в (7)). Использование в радиосетях 5G многоэлементных адаптивных АФАР “Massive MIMO” с узкими лучами в направлении на каждое обслуживаемое ПУ с КНД лучей до 24–30 дБ (250–1000 раз) в сочетании с режимом TDD, обеспечивающим увеличение реальной чувствительности радиоприема МС за счет снижения уровней внутрисетевых помех, способно практически компенсировать влияние роста ЭИИМ БС на увеличение средней интенсивности сопутствующего ЭМФ. Однако безопасная эксплуатация систем 5G для населения со средними уровнями сопутствующего ЭМФ не выше нескольких мкВт/см<sup>2</sup> при АТС  $S_{ir} \rightarrow 10^7$  бит/с/м<sup>2</sup> возможна только при условии, что в макросотах с АФАР “Massive MIMO” АТС не превысит уровень  $10^5$  бит/с/м<sup>2</sup>, заявленный для систем 4G (см. рис. 5), а основная масса мобильного трафика сетей 5G в часы наибольшей нагрузки будет проходить через хотспоты с использованием традиционных точек доступа

диапазона FR1 со слабонаправленными антеннами или многоэлементных адаптивных АФАР “Massive MIMO” миллиметрового диапазона (см. рис. 6).

6. Прогноз уровня безопасности населения в условиях ЭМ загрязнения окружающей среды системами МС предполагает сопоставление прогнозируемых уровней ЭМФ, создаваемого этими системами, с научно обоснованными ПДУ ЭМП РЧ, гарантирующими отсутствие отдаленных последствий этого антропогенного воздействия (сохранение здоровья настоящего и будущих поколений). Поэтому его достоверность определяется как точностью оценок уровней ЭМФ, так и обоснованностью принятых гигиенических нормативов. К сожалению, ранее принятые во многих странах значения ПДУ ЭМП РЧ, распространяемые на воздействие ЭМП в диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ, не в полной мере адекватны ЭМ воздействию систем 4G/5G и, по-видимому, требуют уточнений.

В частности, потенциальная опасность неконтролируемой экспансии 5G определяется не только ожидаемым значительным ростом интенсивности ЭМФ (рис. 4–6), но и существенным усложнением спектрально-временной структуры сигналов МС. В системах 4G/5G все чаще используются обеспечивающие ряд преимуществ импульсные режимы передачи данных (TDD), которые в полосах каналов шириной 10–100 МГц и более обеспечивают очень короткую длительность фронта импульса. Восприимчивость организма человека к таким сигналам значительно выше, чем к сигналам МС предыдущих поколений [58, 59]. С этой точки зрения они аналогичны сигналам импульсных радиолокационных станций (РЛС), для которых в ряде стран по результатам многолетнего анализа здоровья населения на территориях, прилегающих к мощным радиотехническим объектам с РЛС, установлены ПДУ облучения главным лепестком в режиме кругового сканирования 25–100 мкВт/см<sup>2</sup>. Средняя ППМ этого воздействия за период кругового сканирования в 10–100 раз ниже ПДУ, ранее принятых для непрерывных и квазинепрерывных ЭМП других радиосистем [60, 61 и др.]. Согласно [62, 63], импульсное ЭМ облучение биологически в 25–100 раз активнее непрерывного при одинаковой средней мощности облучения. По-видимому, ЭМП с существенно различающимися частотами, типами модуляции и шириной спектра также обладают разной степенью биологической

активности. К сожалению, результаты глубоких, объективных и независимых научных исследований, направленных на анализ адекватности и, при необходимости, на уточнение ПДУ ЭМП систем МС новых поколений, использующих ЭМП сложной спектрально-временной структуры в различных частотных диапазонах, практически отсутствуют. Это ограничивает объективность анализа безопасности этих систем МС для населения.

Следует принимать во внимание, что существенное различие в ПДУ ЭМП, определяемых различного рода нормативными актами и рекомендациями, определяется не только различиями статуса (норматив, рекомендация) и методического характера (диапазоны частот, виды ЭМП РЧ, значения понижающего фактора, виды учитываемых эффектов воздействия ЭМП РЧ на организм и др.), но и их различным назначением. Так, ПДУ [15] в десятки Вт/м<sup>2</sup> фактически определяют верхние границы безопасности ЭМП РЧ с точки зрения теплового поражения биоткани при сравнительно непродолжительном воздействии ЭМП РЧ большой интенсивности, ПДУ в единицы–десятки мкВт/см<sup>2</sup> определяют эти границы для продолжительного нетеплового воздействия ЭМП РЧ, не приводящего к отдаленным последствиям для здоровья населения [13, 14], а категории строительной биологии в части проблемности воздействия на человеческий организм ЭМП РЧ [64, 65] привязаны к уровню естественного ЭМФ, и даже уровни ЭМП РЧ 1–100 нВт/см<sup>2</sup> определены как неприемлемые в силу существенных изменений физических характеристик среды обитания, способных быть причиной будущих нарушений здоровья. Столь значительный разброс в критериях оценки интенсивности антропогенного ЭМФ не может не быть причиной возможной существенно различной интерпретации результатов оценок условной средней интенсивности ЭМФ с использованием приведенных выше соотношений.

7. Выражения (7), (8), а также результаты расчетов, представленные на рис. 4–6, несколько идеализированы, так как в системах 4G/5G спектральная эффективность нисходящего канала в 1.5–2 раза выше спектральной эффективности восходящего канала (что может быть учтено соответствующим поправочным коэффициентом в (8)), и спектральная эффективность радиоканалов МС зависит от расстояний между БС и ПУ, определяющих уровни полезного сигнала

в этих радиоканалах [52]. Поскольку п.р.в. и математические ожидания значений ППМ БС в ТН были получены при выводе выражения (5), учет этой зависимости в (7), (8) также не вызывает затруднений.

Следует отметить, что оценки ЭМНТ с использованием (7) определяются значениями средних уровней АТС и инвариантны к методам реализации мобильного трафика в системах МС, в частности, к его реализации

а) с максимальной скоростью передачи данных или с существенно меньшей, однако эта скорость связана со спектральной эффективностью  $S_{ER}$  и параметром  $m$ , описывающим отличие фактической спектральной эффективности радиоканалов от потенциальной, определяемой [49];

б) с высокой территориальной плотностью малоканальных и маломощных БС фемто- и пикосот или с малой территориальной плотностью мощных БС макросот, однако первый вариант с точки зрения безопасности населения предпочтительнее, поскольку параметр  $R_{max}$  в выражении (7) находится в числителе и во второй степени.

8. Представленная методика также применима для анализа интегральных уровней ЭМФ внутри помещений при реализации сценариев М2М/мМТС/ИоТ (массовая межмашинная связь / интернет вещей) в многоэтажной городской застройке с 3D-распределением множества излучающих ПУ внутри зданий [66, 67]. Кроме того, средняя ЭМНТ, определяемая исключительно через энергетические характеристики ЭМП, облучающих рассматриваемую территорию, инвариантна к виду излучающей аппаратуры, что позволяет использовать представленную методику для оценки уровней техногенного ЭМ загрязнения среды обитания излучениями систем всех радиослужб.

9. Приведенные выше соотношения и расчетные примеры убеждают в том, что в условиях масштабной экспансии технологий, систем и услуг беспроводного информационного обслуживания современного общества, существенно изменяющей физические характеристики среды обитания, понятие о проблеме ЭМ совместимости (ЭМС) в узком смысле лишь как о проблеме ЭМС объектов технической природы (радиоэлектронного оборудования) теряет адекватность, и требует очевидного расширения на такие области, как ЭМ безопасность

населения и ЭМ экология среды обитания (ЭМС систем МС и населения, ЭМС технических и биологических объектов, ЭМС различных элементов биосферы и т.п.) в силу единства причин возникновения этих проблем и идентичности энергетических критериев принятия решения об их опасности, а также общности методик их анализа и решения [68].

10. Представленная методика анализа ЭМФ, создаваемого системами МС, основанная на анализе создаваемых этими системами АТС и ЭМНТ, позволяет анализировать процессы формирования ЭМФ при реализации практически всех сценариев и сервисов МС и прогнозировать уровни ЭМФ для эффективного управления процессами развития и внедрения технологий и услуг 4G/5G/6G в интересах обеспечения их экологичности и безопасности для населения.

Принимая во внимание актуальность проблемы оценки антропогенного ЭМ загрязнения среды обитания при интенсивном развитии систем и сервисов 4G/5G/6G, автор убежден в важности дальнейшего развития и верификации представленной методики с целью расширения возможностей ее практического использования.

Представленные в статье расчетные данные позволяют сделать вывод, что реализация сценариев 5G при декларируемых уровнях АТС  $10^6$ – $10^7$  бит/с/м<sup>2</sup> может сопровождаться образованием ЭМФ с уровнями, близкими к “тепловым” ограничениям [15] и даже их превышающими, а также в десятки и сотни раз превышающими гигиенические нормативы многих стран, принятые с учетом опасности отдаленных последствий “нетеплового” воздействия ЭМП РЧ на здоровье населения. В первую очередь это касается реализации сценариев и сервисов 5G с использованием внешних БС с радиусами зон обслуживания от 200 м в местах с высокой плотностью населения и деловой активностью, а также функционирования фемто- и пикосот в диапазоне FR2 с использованием традиционных слабонаправленных антенн БС.

Вклад излучений ПУ в суммарную интенсивность ЭМФ при их локальной пространственной концентрации также может быть значительным, сопоставимым со вкладом излучений БС, что в настоящее время при анализе вынужденных рисков для здоровья населения не учитывается. Все это свидетельствует о необходимости объективного и независимого анализа возможных

уровней ЭМ загрязнения среды обитания при полномасштабной реализации всей совокупности предлагаемых сценариев и сервисов 4G/5G/6G с целью обоснования соответствующих условий и ограничений, гарантирующих безопасность населения и отсутствие вреда окружающей среде.

Автор выражает надежду, что изложенная методика анализа ЭМФ, создаваемого системами МС, позволит перейти от эмоционального качественного к объективному количественному анализу соответствующих вынужденных рисков для здоровья населения, определить условия, при соблюдении которых современные и перспективные системы и услуги беспроводного информационного обслуживания общества будут и эффективны, и выгодны, и безопасны, и на этой основе обеспечить необходимое управление процессами реализации систем и услуг МС 4G/5G/6G.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность д-ру биол. наук О.А. Григорьеву и д-ру мед. наук В.Н. Никитиной за поддержку и ценные замечания и предложения при выполнении исследований по тематике статьи.

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

The author declares no conflicts of interests.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мордачев Владимир Иванович (Mordachev Vladimir Ivanovich), <https://orcid.org/0000-0002-2036-3066>, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь (Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus), [mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ozdemir A.R., Alkan M., Gulsen M. Time Dependence of Environmental Electric Field Measurements and Analysis of Cellular Base Stations. *IEEE EMC Magazine*. 2014;3: 43–48.
2. Burgi A., Theis G., Siegenthaler A., Roosli M. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol.* 2008;18: 183–191.

3. Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J., Grellier J. et al. Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol.* 2015;25:37–44.
4. Ibrani M., Hamiti E., Ahma L., Halili R., Dragusha B. Comparative Analysis of Downlink Signal Levels Emitted by GSM 900, GSM 1800, UMTS, and LTE Base Stations. 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, June 28–30, 2017, Budva, Montenegro, 5 p.
5. Joseph W., Verloock L., Goeminne F., Vermeeren G., Martens L. Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments. *Health Phys.* 2012;102(2):161–172.
6. Rowley J.T., Joyner K.H. Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol.* 2012;22: 304–315.
7. Gotsis A., Papanikolaou N., Komnakos D. et al. Non-ionizing electromagnetic radiation monitoring in Greece. *Ann. Telecommun.* 2008;63:109–123.
8. Troisi F., Boumis M., Grazioso P. The Italian national electromagnetic field monitoring network. *Ann. Telecommun.* 2008; 63:97–108.
9. Tomitsch J., Dechant E., Frank W. Survey of Electromagnetic Field Exposure in Bedrooms of Residences in Lower Austria. *Bioelectromagn.* 2010;31:200–208, Wiley InterScience, www.interscience.wiley.com.
10. Rufó M., Paniagua J., Jimenez A., Antolín A. Exposure to high-frequency electromagnetic fields (100 KHz–2 GHz) in Extremadura (Spain). *Health Phys.* 2011; 6(101):739–745, www.health-physics.com.
11. Karpowicz J., Miguel-Bilbao S., Ramos V. et al. The evaluation of Stationary and Mobile Components of Radiofrequency Electromagnetic Exposure in the Public Accessible Environment. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2017”, Angers, France, 2017, 4 p.
12. Стаценко Л.Г., Бахвалова А.А., Жмакина И.Д. Электромагнитный фон на территории кампуса ДВФУ на о. Русский: инструментальные измерения. *Вестн. инженерной школы Дальневост. федерального ун-та.* 2021;3(48): 124–132 [Statsenko L., Bakhvalova A., Zhmakina I. Electromagnetic background on the FEFU campus on the Russky Island: instrumental measurements. *Fefu: School of Engineering Bulletin.* 2021;3(48):124–132 (In Russ.)] <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-14>.
13. Григорьев О.А., Гошин М.Е., Прокофьева А.В., Алексеева В.А. Особенности национальной политики, определяющей подходы к гигиеническому нормированию электромагнитного поля радиочастот в различных странах. *Гигиена и санитария.* 2019;98(11):1184–1190 [Grigoriev O., Goshin M., Prokofyeva A., Alekseeva V. Features of national policy in approaches to electromagnetic field safety of radio frequencies radiation in different countries. *Gigiena i Sanitari.* 2019;98(11):1184–1190 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-14>.
14. Григорьев О.А., Никитина В.Н., Носов В.Н. и др. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона. *Здоровье населения и среда обитания,* 2020;10(331):28–33 [Grigoriev O.A., Nikitina V.N., Nosov V.N. et al. Electromagnetic safety of the population. National and international standards for electromagnetic fields of the radio frequency range. *Public Health and Habitat.* 2020;10(331):28–33 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-28-33>
15. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020;118:483–524.
16. Confédération suisse. Initiative populaire fédérale “Pour une téléphonie mobile respectueuse de la santé et économe en énergie”. <https://www.admin.ch/opc/fr/federal-gazette/2019/6525.pdf>.
17. Effets sanitaires éventuels liés aux valeurs élevées de débit d’absorption spécifique de téléphones mobiles portés près du corps. Anses Rapport d’expertise collective. Téléphones mobiles portés près du corps et santé. Édition scientifique. Juillet 2019, p.128.
18. Le Gouvernement agit pour limiter l’exposition aux émissions de certains téléphones mobiles et mieux informer le public. Communiqué de Presse Paris, le 25 octobre, [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/191025-\\_cp\\_anses.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/191025-_cp_anses.pdf).
19. On Petitions for Review of an Order of the Federal Communications Commission. United States Court of Appeals, Decision; 2021 Aug 13 No. 20–1025. Consolidated with 20–1138.
20. EMF scientist: International Appeal: Scientists call for Protection from Non-ionizing Electromagnetic Field Exposure. <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal>. Accessed Oct 11, 2022.
21. Hardell L., Carlberg M. Health risks from radiofrequency radiation, including 5G, should be assessed by experts with no conflicts of interest. *Oncol. Lett.* 2020; 20(15):1–11. <https://doi.org/10.3892/ol.2020.11876>.
22. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. Report ITU-R M.2135-1, 2009.
23. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. Report ITU-R M.2412-0, 2017.
24. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception. 3GPP TS 36.104 V12.10.0 (2016-01).
25. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083, 2015.
26. Тихвинский В.О., Бочечка Г.С. Концептуальные аспекты создания 5G. *Электросвязь.* 2013;10: 29–33 [Tikhvinsky V.O., Bochechka G.S. Conceptual aspects of 5G. *Electrosvyaz.* 2013;10:29–33 (in Russ.)]

27. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018, 441 p.
28. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z. et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 2019;3(14):28–41.
29. Calvanese E., Strinati E.C., Barbarossa S. et al. 6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication. *IEEE VT Magazine*. 2019;3(14):42–50.
30. Mordachev V. Mathematical Models for Radiosignals Dynamic Range Prediction in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks. The IEEE Semi Annual VTC Fall, 2000; 8 p.
31. Мордачев В.И. Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, Изд. центр БГУ, 2009, 319 с. [Mordachev V. System ecology of cellular communications. Belarus State University Publishers, 2009, 319 p. (In Russ.)].
32. Mordachev V., Loyka S. On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. *IEEE JSAC*. 2009;7(27):11201131.
33. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations. Proc. of the 9th Int. Wireless Communications & Mobile Computing Conf. (IWCMC 2013). Cagliari, Italy, 2013. P. 590–595.
34. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2014”. Gothenburg, Sweden, 2014. P. 1275–1280.
35. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment. Proc. of the Joint IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, Germany, 2015. P. 1147–1152.
36. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2016”. Wroclaw, Poland, 2016. P. 590–595.
37. Mordachev V., Svistunov A. Required Levels of Radiation Power of GSM Base Stations on Urban Area Taking Into Account Attenuation in Buildings and Intra-system EMC. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2016”. Wroclaw, Poland, 2016. P. 596–601.
38. Mordachev V. 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, 2017. 6 p. (No. 64).
39. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2018”. Amsterdam, The Netherlands, 2018. P. 202–207.
40. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”. Barcelona, Spain, 2019. P. 82–87.
41. Mordachev V. Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. Proc. of the Int. Virtual Conf. “EMC Europe 2020”. Rome, Italy, 2020. 6 p.
42. Mordachev V. Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC “APEMC-2021”. Bali-Indonesia, 2021. P. 37–40.
43. Мордачев В.И. Оценка вклада излучений пользовательского оборудования в антропогенный электромагнитный фон, создаваемый системами мобильной (сотовой) связи. *Докл. БГУ-ИР*, 2023;21(5):50–58 [Mordachev V.I. Assessment of the Contribution of Radiations of User Equipment to the Anthropogenic Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Doklady BGUIR*. 2023;21(5):50–58 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58>.
44. Мордачев В.И., Ционенко Д.А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона. *Докл. БГУИР*. 2022;20(7):56–64 [Mordachev V.I., Tsyonenko D.A. Influence of spatial selectivity of radiation of base stations on the level of electromagnetic background created by mobile communications. *Doklady BGUIR*. 2022;20(7):56–64 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64>.
45. Review of the harmonised technical conditions applicable to the 3.4–3.8 GHz (‘3.6 GHz’) frequency band. CEPT Report 67, 2018. P.17.
46. Hillert L., Ahlbom A., Neasham D. et al. Call-related factors influencing output power from mobile phones. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol*. 2006;16:507–514.
47. Kelsh M.A., Shum M., Sheppard A.R. et al. Measured radiofrequency exposure during various mobile-phone use scenarios. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol*. 2011;21:343–354.
48. 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.1411-11.
49. Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proc. IRE*. 1949;1(37):10–21.
50. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Rec. ITU-R P.1238-10.
51. Prediction of building entry loss. Rec. ITU-R P.2109-1.

52. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура. М.: Медиа Паблишер, 2014. 384 с. [Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G technologies, applications architecture. Moscow: Media Publisher, 2014. 384 p. (In Russ.)].
53. Ericsson Mobility Reports. 2011-2022. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>. Accessed July 09, 2024.
54. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Утв. Министерством здравоохранения Респ. Беларусь 28.10.2010, Рег. № 093-0610 [Estimation of risk for population health from electromagnetic fields created by base stations of cellular mobile communications and broadband wireless access. Application instructions. Belarus Ministry of Health, No.093-0610, 2010 (In Russ.)].
55. Svistunov A. Estimation of Electromagnetic Background Created by Equipment of Cellular Radio Networks in Urban Areas with High Spatial Density of Subscribers. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2018". Amsterdam, The Netherlands, 2018. P. 184–189.
56. Девятков, Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М.: Радио и связь, 1991, 168 с. [Devyatkov N.D., Golant M.B., Betsky O.V. Millimeter waves and their role in life processes. Moscow: Radio & Sviyas., 1991. 168 p. (In Russ.)].
57. Кураев А.А. Особенности распространения электромагнитных волн КВЧ в живых биологических объектах. *Вестни Нац. Акад. Наук Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук.* 2004;4:71–74 [Kuraev A.A. The peculiarities of EHF electromagnetic waves propagation in alive biological objects. *News of the National Academy of Sciences of Belarus, series of physical and technical sciences.* 2004;4:71–74 (In Russ.)].
58. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Управление электромагнитной обстановкой: баланс между здоровьем и технологиями. *Вестник связи.* 2020;12:20–27 [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. Electromagnetic Environment Management: Balance between Public Health and New Communication Technology. *Vestnik Sviasy.* 2020;12:20–27 (In Russ.)].
59. Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. The microwave range electromagnetic field of non-thermal intensity as a stimulus to the central nervous system. Moscow: FMBC Burnazyana FMBA Russia, 2015. 200 p. (In Russ.)].
60. Предельно допустимые уровни (ПДУ) плотности потока энергии (ППЭ), создаваемой радиолокационными станциями в прерывистом режиме воздействия на население. Гигиенические нормативы 2.1.8. 11-34-2005, Утв. Постановлением Гл. гос. сан. врача Респ. Беларусь № 197 28.11.2005 [Maximum permissible levels (MPL) of energy flux density (EFD) created by radar stations in intermittent mode of exposure to the population. Hygienic standards 2.1.8.11-34-2005. Minsk: Belarus, 2005. (In Russ.)].
61. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания. СанПиН 1.2.3685-21, Рос. Федерация, 2021. 469 с. [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and/or harmlessness of environmental factors for population. SanPiN 1.2.3685-21. Moscow, Russia, 2021. 469 p. (In Russ.)]
62. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018, 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Quantitative criteria of microwave damage. Moscow: GEOS Publ. 2018, 232 p. (In Russ.)]
63. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы оценки. *КОНЦЕПЦИИ.* 2022;1 (41): 3–17 [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. The effects of wireless communication electromagnetic energy influence on persons: predictions of the growth for conditioned morbidity, their implementation and problems of evaluation. *CONCEPCII.* 2022;1(41):3–17 (In Russ.)].
64. Maes B. Standard of building biology testing methods. Inst. Building Biol. + Sustainability IBN, Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008, 2008.
65. Guideline of the Austrian Medical Association for the Diagnosis and Treatment of EMF-Related Health Problems and Illnesses (EMF Syndrome), Standard, 2012. P. 1–17. [Online]. Available: <https://www.magdahavas.com/wp-content/uploads/2012/06/Austrian-EMF-Guidelines-2012.pdf>.
66. Mordachev V. System analysis of electromagnetic environment created by radiating 4G/5G user equipment inside buildings. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022". Gothenburg, Sweden, 2022. P.525–530.
67. Mordachev V. Influence of the Radiating UE Distribution Irregularity in Building Internal Space on the Level of Indoor Electromagnetic Background. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023". Krakow, Poland. 2023. 6 p.
68. Мордачев В.И., Свистунов А.С., Синькевич Е.В. Электромагнитная безопасность систем мобильной связи 4G/5G. *Докл. БГУИР.* 2024;2(22):80–91 [Mordachev V., Svistunov A., Sinkevich E. Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR.* 2024;2(22):80–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>.

## Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications

V. I. Mordachev\*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Belarus*

*\*E-mail: mordachev@bsuir.by*

The technique of integral assessment of the radio frequency electromagnetic background (EMB) intensity created by wireless information services is presented, based on the forecast of the average electromagnetic loading on area created by radiations of spatially distributed base stations and mobile terminal devices. This loading can be determined both on the basis of a direct estimate of the average total irradiation power of the Earth's surface by base stations or the average total radiation power of terminal devices per unit of its area, and on the basis of an estimate of the average area traffic capacity and known parameters of equipment and topology of mobile communication networks. Expressions to estimate the conditional average levels of EMB generated by stationary and mobile components of mobile communication systems, and the results of calculations illustrating the processes of its generation by these systems in different frequency ranges with different average area traffic capacity and different sizes of service areas of base stations are given. These calculations confirm the real danger of an unacceptable decrease in the level of electromagnetic safety of the population and deterioration of the ecology of the habitat without the implementation of scientifically based restrictions on the characteristics of mobile communication systems and services.

**Keywords:** mobile communications, 4G, 5G, 6G, electromagnetic background, electromagnetic safety, electromagnetic ecology, electromagnetic loading on area, area traffic capacity