



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-54-62>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.391.82

## НЕОБХОДИМЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ (СОТОВОЙ) СВЯЗИ 4G/5G ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

В.И. МОРДАЧЕВ

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

*Поступила в редакцию 15 октября 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Реализация планов интенсивного развития технологий, систем и услуг мобильной (сотовой) связи (СС) четвертого (4G) и пятого (5G) поколений, а к 2030 году и шестого поколения (6G), предполагающая увеличение на много порядков скоростей передачи данных по радиоканалам пользовательских интерфейсов, без принятия специальных мер и ограничений может сопровождаться значительным увеличением мощности электромагнитного излучения абонентского оборудования. Эта мощность, верхние пределы которой определены на уровне 23–26 дБм, что превышает безопасные уровни для населения, определяет степень приемлемости добровольных экологических рисков от внедрения 4G/5G/6G во все сферы человеческой деятельности. Цель работы – оценка ожидаемых ограничений на системные характеристики мобильной связи 4G/5G при использовании безопасных для населения уровней мощности электромагнитного излучения абонентских устройств. В качестве анализируемых характеристик систем мобильной связи рассмотрены максимальная дальность связи, максимально допустимая скорость передачи данных и допустимый относительный уровень внутрисетевых помех. Количественный системный анализ этих ограничений, результаты которого приведены в данной работе, позволяет обосновать необходимые системные, технические и организационные решения, направленные на обеспечение требуемого уровня электромагнитной безопасности потребителей услуг 4G/5G/6G в условиях быстрого развития этих систем без ущерба эффективности технологий информационного обслуживания современного общества.

**Ключевые слова:** мобильная связь, 4G, 5G, 6G, абонентское устройство, электромагнитное излучение, мощность, распространение радиоволн, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Мордачев В.И. Необходимые ограничения на характеристики систем мобильной (сотовой) связи 4G/5G для обеспечения их безопасности для пользователей. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 54-62.

## REQUIRED RESTRICTIONS ON CHARACTERISTICS OF 4G/5G MOBILE (CELLULAR) COMMUNICATIONS TO ENSURE THEIR SAFETY FOR USERS

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

*Submitted 15 October 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Implementation of intensive development of technologies, systems, and services of mobile (cellular) communications (CC) of the fourth (4G) and fifth (5G), and by 2030 also the sixth (6G) generation, implying an increase by many orders of magnitude in the data transmission rates over radio channels of user interfaces, without adopting special measures and restrictions may be accompanied by a significant increase in the power of electromagnetic radiation of subscriber devices. This power, the upper limits of which are determined at the level of 23–26 dBm, that exceeds the safe levels for the population, determines the degree of acceptability of voluntary environmental risks from the penetration of 4G/5G/6G technologies and services into all spheres of human activity. The goal of the work is to assess the expected limitations on system characteristics of 4G/5G mobile communications when using population friendly electromagnetic radiation power levels of the user's radio equipment. As the analyzed characteristics of mobile communication systems, the maximum communication range, the maximum allowable data transmission rate and the allowable relative level of intranet interference are considered. A quantitative systemic analysis of these limitations, the results of which are presented in this work, makes it possible to substantiate the necessary system, technical and organizational solutions aimed at ensuring the necessary level of electromagnetic safety for consumers of 4G/5G/6G services in the context of the rapid development of these systems without compromising the efficiency of technologies of information services for modern society.

**Keywords:** mobile communications, 4G, 5G, 6G, user's equipment, electromagnetic radiation, power, radio waves propagation, electromagnetic ecology, electromagnetic safety.

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

**For citation.** Mordachev V.I. Required Restrictions on Characteristics of 4G/5G Mobile (Cellular) Communications to Ensure their Safety for Users. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 54-62.

### Введение

Быстрое развитие мобильной связи, сопровождающееся увеличением объемов и скоростей передачи данных как по прямым (от базовой (БС) к мобильной абонентской (МС) станции), так и по обратным (от МС к БС) каналам связи до 0,1–10 Гбит/с и более, увеличением ширины полос частот радиоканалов (РК) до 10–20 МГц (системы 4G: LTE) и до 40–160 МГц (системы 5G NR) [1–3], несмотря на известные достижения в области повышения спектральной эффективности РК систем сотовой (мобильной) связи (СС), чревато крайне негативными последствиями с точки зрения электромагнитной безопасности абонентов этих систем.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) МС является источником опасности для здоровья. Принятый в настоящее время практический критерий экспериментальной оценки опасности ЭМИ МС, основанный на измерениях контролируемых уровней плотности потока энергии ЭМИ МС СС [4], позволяет считать безопасной мощность ЭМИ МС не более 50–55 мВт при максимальной мощности ЭМИ МС СС стандартов GSM, UMTS, LTE в пределах 0,1–0,4 Вт. Планируемое резкое увеличение скоростей передачи информации по обратному каналу в системах 4G/5G сопряжено с существенным увеличением необходимой мощности ЭМИ МС и, как следствие, недопустимым увеличением добровольных экологических рисков для населения.

Цель данной работы – оценка ожидаемых ограничений на характеристики систем СС 4G/5G (таких как максимальная дальность связи, максимально допустимая скорость передачи данных, допустимый относительный уровень внутрисетевых помех и т. п.) в условиях сохранения ограничений на мощность ЭМИ МС, при декларируемом увеличении скоростей передачи данных по этим каналам. Эта оценка выполнена с использованием методики, изложенной в [5].

### Минимально необходимая мощность ЭМИ МС

При распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве плотность потока мощности электромагнитного поля (ЭМП)  $Z_{MS}$  от МС с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ)  $P_{eMS}$  на входе приемной антенны БС, удаленной от МС на расстояние  $R$ , и эффективная площадь  $S_{eBS}$  приемной антенны БС с коэффициентом усиления главного лепестка  $G_{0BS}$  определяются следующими известными соотношениями:

$$Z_{MS} = \frac{P_{eMS}}{4\pi R^2}, \quad S_{eBS} = \frac{\lambda^2 G_{0BS}}{4\pi},$$

где  $\lambda$  – длина волны принимаемого ЭМП. Мощность сигнала, принимаемого БС, на входе ее радиоприемника (РП) будет равна (без учета потерь в приемном антенно-фидерном тракте БС)

$$P_{BS\ IN} = Z_{MS} S_{eBS} = \frac{P_{eMS} \lambda^2 G_{0BS}}{16\pi^2 R^2}.$$

Реальная чувствительность РП БС  $P_{BS0}$  в радиосети СС определяется мощностью внутреннего теплового  $P_0$  и внешнего  $P_{INT}$  шума, полосой частот радиоприема  $\Delta F_R$  и минимально необходимым значением отношения «сигнал/(шум + помеха)»  $CNIR_0$ . В широкополосных РК цифровых систем 4G/5G свойства внутрисетевых помех СС могут быть приняты близкими свойствам гауссовского шума, что позволяет использовать следующие очевидные соотношения:

$$P_0 = kT_0 K_N \Delta F_R, \quad P_{INT} = P_0 K_{CC}, \quad P_{\Sigma} = (1 + K_{CC})P_0, \quad P_{BS0} = P_{\Sigma} \cdot CNIR_0,$$

$$W_{EP} = \frac{C_{PR}}{\Delta F_R} = \frac{mC_{RR}}{\Delta F_R} = mW_{ER} \approx \log_2(1 + CNIR), \quad CNIR = 2^{\frac{mC_{RR}}{\Delta F_R}} - 1,$$

$$C_{RR} = \frac{\Delta F_R}{m} \log_2(1 + CNIR), \quad \Delta F_R = \frac{mC_{RR}}{\log_2(1 + CNIR)},$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/К – постоянная Больцмана;  $K_N$  – коэффициент шума РП БС,  $T_0$  – абсолютная температура ( $T_0 = 290$ К);  $P_{\Sigma}$  [Вт] – суммарная мощность шума в полосе  $\Delta F_R$  РК, равная сумме мощности собственного теплового шума  $P_0$  и мощности внутрисетевой помехи  $P_{INT}$ ;  $CNIR$  – отношение «сигнал/(шум + внутрисетевая помеха)» в РК;  $C_{PR}$  [бит/сек] и  $W_{EP}$  [бит/сек/Гц] – потенциальные пропускная способность и спектральная эффективность РК, которые в  $m$  раз превышают его реальные пропускную способность  $C_{RR}$  и спектральную эффективность  $W_{ER}$ :  $C_{PR} = mC_{RR}$ ,  $W_{EP} = mW_{ER}$ .

При расстоянии  $R$  между МС и БС реальное отношение «сигнал/(шум + помеха)»  $CNIR_R$  на входе радиоприемника БС в условиях свободного РРВ будет равно

$$\frac{P_{BS\ IN}}{P_{\Sigma}} = CNIR_R = \frac{P_{eMS} \lambda^2 G_{0BS}}{16\pi^2 R^2 P_0 (1 + K_{CC})} = 2^{mW_{ER}} - 1.$$

Соответственно, для того, чтобы в этих условиях РРВ было обеспечено нормальное функционирование радиолинии (заданное минимальное значение  $CNIR_0$  либо минимально необходимый уровень полезного сигнала, равный уровню пороговой чувствительности радиоприема БС  $P_{BS0}$ ), ЭИИМ МС должна быть не менее следующего значения:

$$P_{eMS0} = \frac{16\pi^2 R^2 P_0 (1 + K_{CC}) CNIR_0}{\lambda^2 G_{0BS}}, \quad CNIR_0 = 2^{\frac{mCRR}{\Delta FR}} - 1. \quad (1)$$

При распространении радиоволн от МС к макро-БС в городской застройке на расстояния от нескольких сотен метров, когда условия РРВ существенно сложнее и дополнительно требуется обеспечить энергетический запас  $D_{\Sigma 0} = L_m K_H L_C$  в ЭИИМ МС, учитывающий необходимый запас  $L_m$  на преодоление затухания радиоволн при их распространении внутри здания ( $L_m \leq 100$  [6]), запас  $K_H$  на реализацию хендовера ( $K_H \leq 10$ ) и запас  $L_C$  на замирания в городских каньонах ( $L_C \leq 100$  [7]), общий запас в ЭИИМ МС необходимо увеличить до уровня  $D_{\Sigma}$ :

$$P_{eMS0} = \frac{16\pi^2 R^2 P_0 D_{\Sigma} CNIR_0}{\lambda^2 G_{0BS}}, \quad D_{\Sigma} = (1 + K_{CC}) D_{\Sigma 0}, \quad D_{\Sigma 0} = L_m L_C K_H. \quad (2)$$

Соотношение (2) получено без учета многолучевости РРВ, что характерно для относительно небольших расстояний между МС и БС, когда МС находится внутри «брейкпойнт-окрестности» БС [7] радиуса  $R_{BP} = 4H_{BS}H_{MS}/\lambda$ , где  $H_{BS}$  и  $H_{MS}$  – значения условных значений высоты антенны БС и высоты МС над отражающей поверхностью. Этой поверхностью может являться как земная поверхность, так и поверхности стен и крыш зданий. При расположении МС за пределами этой окрестности характер условий РРВ между МС и БС существенно изменяется из-за наложения прямого и отраженных лучей:

$$L_t = \frac{P_{eMS0}}{P_{BS0}} = \frac{16\pi^2 R^4 D_{\Sigma}}{\lambda^2 G_{0BS} R_{BP}^2}, \quad R \geq R_{BP}, \quad R_{BP} = \frac{4H_{BS}H_{MS}}{\lambda}.$$

В результате имеет место следующая зависимость:

$$P_{eMS0} = P_0 L_t CNIR_0 = \frac{16\pi^2 R^4 D_{\Sigma} P_0 \cdot CNIR_0}{\lambda^2 G_{0BS} R_{BP}^2} = \frac{\pi^2 R^4 D_{\Sigma} P_0 \cdot CNIR_0}{G_{0BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2}, \quad (3)$$

$$R \geq R_{BP}, \quad R_{BP} = \frac{4H_{eBS}H_{eMS}}{\lambda}, \quad CNIR_0 = 2^{\frac{mCRR}{\Delta FR}} - 1.$$

Следует обратить внимание на отсутствие зависимости  $P_{eMS0}$  от длины волны ЭМИ МС, что позволяет считать (3) асимптотой.

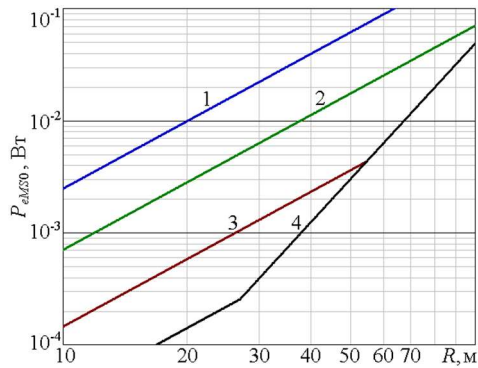
### Результаты анализа

Как следует из (2), (3), необходимая ЭИИМ МС  $P_{eMS0}$  определяется требуемыми энергетическим запасом  $D_{\Sigma}$  радиолинии, дальностью радиосвязи  $R$  и пропускной способностью РК  $C_{RR}$ , а также зависит от коэффициента усиления  $G_{0BS}$ , величин  $CNIR_0$  и  $\Delta FR$  и зависящего от  $\lambda$   $H_{BS}$  и  $H_{MS}$  радиуса области  $R_{BP}$  свободного РРВ вокруг БС. При нахождении МС внутри этой области необходимая ЭИИМ МС также существенно зависит от длины волны ЭМИ МС.

На рис. 1–4 приведены расчетные зависимости необходимой ЭИИМ МС от дальности  $R$  радиосвязи (рис. 1, 2, 4) и пропускной способности РК (рис. 3), полученные для высоты МС над поверхностью  $H_{OP} = 1,5$  м и пропускной способности РК, близкой к потенциальной ( $m = 1,33$ ); расчеты выполнены для  $CNIR_0 = 100$  (20дБ).

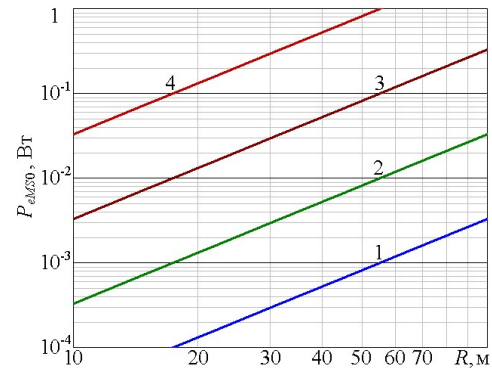
Графики на рис. 1, 2 рассчитаны для пико-БС, фактически представляющих собой хот-споты – точки доступа на ограниченной площади или внутри помещений ( $G_{BS} = 4$  (6 дБ),  $H_{BS} = 3$  м). Для этих условий принят относительно небольшой энергетический запас  $D_{\Sigma} = 100$ , учитывающий лишь присутствие внутрисетевых помех от соседних точек доступа, и возможные потери при РРВ за счет многолучевости и влияния местных предметов.

Графики на рис. 3, 4 рассчитаны для внешних макро-БС, расположенных в городской застройке, с высотами подвеса антенн  $H_{BS} = 30$  м, коэффициентами усиления антенн  $G_{BS} = 250$  (24 дБ), соответствующими усилению в лучах современных активных фазированных антенных решеток (АФАР) систем 5G [8]. Для этих условий принят энергетический запас  $D_{\Sigma} = 10^5$ , учитывающий необходимый запас на преодоление затухания радиоволн внутри здания, на реализацию хендовера, на преодоление замираний в городских каньонах и на преодоление влияния внутрисетевых помех от соседних БС. Данная величина запаса для связи МС с макро-БС СС в условиях плотной городской застройки не является чрезмерной.



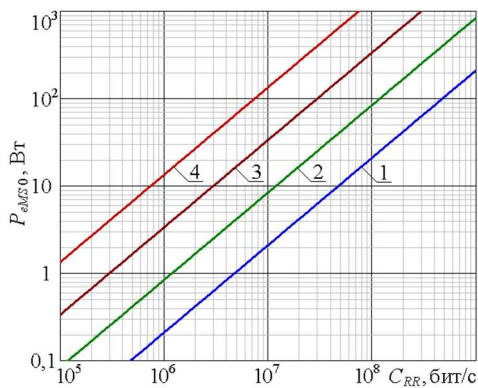
**Рис. 1.** Зависимости необходимой ЭИИМ МС в пико-сайте СС от дальности радиосвязи при  $\Delta F_R = 20$  МГц,  $C_{RR} = 100$  Мбит/с для различной длины волны ЭМИ МС:  $\lambda = 0,08$  м – кривая 1,  $\lambda = 0,15$  м – кривая 2,  $\lambda = 0,33$  м – кривая 3,  $\lambda = 0,67$  м – кривая 4

**Fig. 1.** Dependences of the required MS EIRP in CC pico-site on the radio communication range at  $\Delta F_R = 20$  MHz and  $C_{RR} = 100$  Mbit/s for different wavelengths of the MS EMR:  $\lambda = 0.08$  m – curve 1,  $\lambda = 0.15$  m – curve 2,  $\lambda = 0.33$  m – curve 3,  $\lambda = 0.67$  m – curve 4



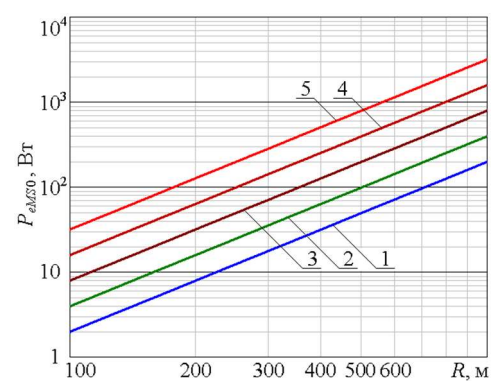
**Рис. 2.** Зависимости необходимой ЭИИМ МС в пико-сайте 5G (3,6 ГГц) от дальности радиосвязи для различной скорости передачи данных (пропускной способности РК):  $C_{RR} = 1$  Мбит/с – кривая 1,  $C_{RR} = 10$  Мбит/с – кривая 2,  $C_{RR} = 100$  Мбит/с – кривая 3,  $C_{RR} = 1$  Гбит/с – кривая 4

**Fig. 2.** Dependences of the required MS EIRP in 5G pico-site (3.6 GHz) on the radio communication range for different data transmission rates (uplink channel capacity):  $C_{RR} = 1$  Mbit / s – curve 1,  $C_{RR} = 10$  Mbit / s – curve 2,  $C_{RR} = 100$  Mbps – curve 3,  $C_{RR} = 1$  Gbps – curve 4



**Рис. 3.** Зависимости необходимой ЭИИМ МС в макро-сайте 5G (3,6 ГГц, CNIR = 20дБ) от скорости передачи данных (пропускной способности РК) для различной дальности радиосвязи:  $R = 200$  м – кривая 1,  $R = 400$  м – кривая 2,  $R = 800$  м – кривая 3,  $R = 1600$  м – кривая 4

**Fig. 3.** Dependences of the required MS EIRP in 5G macro-site (3.6 GHz, CNIR = 20 dB) on the data transmission rate (uplink channel capacity) for different radio communication ranges:  $R = 200$  m – curve 1,  $R = 400$  m – curve 2,  $R = 800$  m – curve 3,  $R = 1600$  m – curve 4



**Рис. 4.** Зависимости необходимой ЭИИМ МС в макро-сайте 5G (3,6 ГГц, CNIR = 20дБ) от дальности радиосвязи при различной полосе частот РК:  $\Delta F_R = 10$  МГц – кривая 1,  $\Delta F_R = 20$  МГц – кривая 2,  $\Delta F_R = 40$  МГц – кривая 3,  $\Delta F_R = 80$  МГц – кривая 4,  $\Delta F_R = 160$  МГц – кривая 5

**Fig. 4.** Dependences of the required MS EIRP in 5G macro-site (3.6 GHz, CNIR = 20 dB) on the radio communication range for different uplink frequency bands:  $\Delta F_R = 10$  MHz – curve 1,  $\Delta F_R = 20$  MHz – curve 2,  $\Delta F_R = 40$  MHz – curve 3,  $\Delta F_R = 80$  MHz – curve 4,  $\Delta F_R = 160$  MHz – curve 5

В режиме передачи данных от МС к БС мощность ЭМИ МС максимальна в связи с обеспечением максимально возможной скорости передачи информации. Этим режим передачи данных отличается от режима сотовой телефонии с постоянной скоростью передачи данных 32–64 кбит/с, в котором используется регулировка мощности ЭМИ МС в широком диапазоне до минимального уровня, при котором обеспечивается нормальное качество связи.

Поскольку требования к качеству радиоприема МС и БС симметричны, как симметричны и процессы образования внутрисетевых помех функционированию МС и БС, а также в силу малых различий в шумовых свойствах радиоприемников МС и БС, соотношения (2), (3) применимы и для анализа необходимой ЭИИМ БС  $P_{eBS0}$  при условии замены в них коэффициента усиления  $G_{0BS}$  приемной антенны БС коэффициентом усиления антенны МС, принимаемым, как и в (2), (3), равным единице:

$$P_{eBS0} = \begin{cases} \frac{16\pi^2 R^2 P_0 D_\Sigma CNIR_0}{\lambda^2}, & R_{BP} \leq \frac{4H_{eBS}H_{eMS}}{\lambda}, \\ \frac{\pi^2 R^4 D_\Sigma P_0 \cdot CNIR_0}{H_{eBS}^2 H_{eMS}^2}, & R_{BP} > \frac{4H_{eBS}H_{eMS}}{\lambda}. \end{cases} \quad (4)$$

В системах СС 2G/3G средняя мощность ненаправленного ЭМИ МС определена на уровне 100–250 мВт (20–24 дБм) [ETSI EN 300 910, ETSI TS 125 101], в системах СС 4G – 200–400 мВт (23–26 дБм) [ETSI EN 301 908-25], в системах 5G следует ожидать сохранения ограничений на ЭИИМ МС на этом же уровне [9] с учетом опасности ЭМИ МС для здоровья.

В этих условиях, как следует из анализа графиков на рис. 1, 2 обеспечение высоких скоростей передачи информации по РК от МС к БС, декларируемых в [1–3], возможно за счет:

- уменьшения дальности радиосвязи между МС и БС до единиц-десятков метров, обеспечения прямой видимости между МС и БС и высокой направленности луча приемной антенны БС, при которых требуется существенно меньший энергетический запас по мощности ЭМИ МС  $D_\Sigma$  в (2), (3);

- использования, по возможности, частот нижней части диапазона, выделенного для СС, а также использования пакетной передачи данных (отдельными импульсами или фреймами), при которой импульсная мощность ЭМИ МС существенно выше средней, регламентированной в [ETSI EN 301 908-25] (однако безопасность этих режимов МС 5G требует отдельных исследований).

Принимая во внимание данные [10, 11] о скоростях передачи данных по РК 5G при реализации различных сервисов, можно сделать следующие предварительные выводы об их потенциальной опасности для населения.

1. Для оборудования Интернета вещей (IoT) – датчиков, устройств экстренного оповещения (счетчики воды, газа, электричества; контроллеры уличного освещения; датчики парковочного места; сенсоры дыма/огня; датчики взлома баки и т. п.), передающего данные с относительно малой скоростью и низкой удельной интенсивностью трафика, ЭИИМ МС может быть ограничена на безопасном уровне 10–100 мВт даже при дальности связи до 1 км.

2. Для оборудования удаленной телеметрии и контроля объектов, для которого необходимы скорости передачи данных 0,5–2 Мбит/с, уровень ЭИИМ МС не более 0,1–0,2 Вт может быть обеспечен при дальности связи не более 200–300 м; передача данных удаленной телеметрии и контроля объектов со скоростями 1–2 Мбит/с в условиях городской застройки на большие расстояния может потребовать ЭИИМ МС от 0,5–1 Вт и более. Принимая во внимание, что данное оборудование является технологическим и автономным, степень его электромагнитной безопасности будет определяться условиями и массовостью его использования на селитебной территории.

3. Функционирование беспилотного транспорта требует обеспечения скорости передачи данных по РК 5G 2–20 Мбит/с. Обеспечение этой скорости в зависимости от условий РРВ между МС и БС и дальности связи может требовать ЭИИМ от сотен мВт до десятков Вт.

При обеспечении прямой видимости между МС и БС и дальности связи до 0,4–0,5 км ЭИИМ 0,1–0,4 Вт может быть вполне достаточной. И поскольку этот сервис не связан с непосредственным использованием МС населением, данный уровень ЭМИ МС, по предварительным оценкам, может быть признан безопасным. Однако при функционировании

беспилотного транспорта в городской застройке в условиях, когда прямая видимость между МС и БС отсутствует, а дальность радиосвязи может достигать 1 км и более, устойчивая работа радиолиний может требовать больших ЭИИМ МС, что, безусловно, может представлять опасность для населения.

4. Онлайн-игры, для которых требуются скорости передачи данных по РК 5–50 Мбит/с, могут быть реализованы при относительно безопасных значениях ЭИИМ МС 100–200 мВт только в зоне обслуживания пико-БС на дальностях связи не более 50–100 м в условиях свободного РРВ, а также при условии, что на обслуживаемой территории будут обеспечены допустимые уровни экологических рисков. Так, средняя интенсивность электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого ЭМИ МС, на уровне 50 % от предельно допустимого уровня (ПДУ) радиочастотных ЭМП 0,1 Вт/м<sup>2</sup> (что учитывает одновременное присутствие ЭМП БС), будет достигнута при суммарной средней электромагнитной нагрузке на территорию (ЭМНТ), создаваемой ЭМИ МС, порядка 10 мВт/м<sup>2</sup> [12]. Если же принимать во внимание вынужденные экологические риски посторонних лиц при их возможном случайном перемещении по территории зоны обслуживания БС, связанные с ЭМИ МС, то допустимый уровень средней ЭМНТ, создаваемой ЭМИ МС, оказывается примерно втрое ниже [13].

5. Сверхвысокоскоростные сервисы будущего «Дополненная реальность» (0,5–2 Гбит/с), «Виртуальная реальность» (1–5 Гбит/с) и «Тактильный Интернет» (2–10 Гбит/с) могут быть реализованы с безопасными для пользователей ЭИИМ МС только на дальностях связи не более нескольких десятков метров в условиях РРВ в свободном пространстве при минимальных уровнях внутрисетевых помех, т. е. при их реализации в ограниченном пространстве зоны обслуживания пико-БС (хотспота) в диапазоне УВЧ и нижней части диапазона СВЧ. Эти же сервисы с длинами волн около 1 см для их реализации с ЭИИМ МС не более 100–250 мВт могут быть безопасными только при значительном увеличении спектральной эффективности РК (за счет использования технологии ММО и адаптивных диаграмм направленности антенн БС, обеспечиваемых при использовании многоэлементных адаптивных АФАР).

6. Концепция “5G”, по существу представляя собой совокупность бизнес планов организации информационного обслуживания населения по различным направлениям, включает сервис «Потоковое видео», организуемое со скоростью 0,1–5 Гбит/с [10] в целях предоставления населению видеоконтента сверхвысокой четкости UHD TV 4/8к (4096/8192 пикселей по горизонтали). Указанная скорость передачи данных декларируется для скорости скачивания информации (скорость передачи данных запроса на скачивание может быть на несколько порядков ниже), этот сервис позиционируется в качестве конкурентного дополнения к сервисам спутниковых и волоконно-оптических систем многопрограммного телевидения и городских систем видеонаблюдения с интеллектуальным распознаванием лиц. Принимая во внимание, что эти сервисы 5G, по видимому, обеспечат основную долю территориальной плотности беспроводного трафика и основной вклад в формирование совокупной интенсивности радиочастотного ЭМФ, создаваемого системами 5G в местах с высокой плотностью населения, целесообразность их развертывания вызывает наибольшие сомнения, поскольку беспроводная реализация этих сервисов в сетях 5G предполагает увеличение максимальной ЭИИМ отдельных АФАР макро-БС до десятков киловатт и создание на селитебной территории уровней ЭМП до 10–50 Вт/м<sup>2</sup> [8], что в 100–500 раз превышает гигиенические нормативы, принятые в Республике Беларусь, Российской Федерации и многих других странах, и представляет несомненную опасность для здоровья населения.

7. Выводы 1–6 в основном касаются условий, при которых передача информации по РК 5G обеспечивается при относительно безопасных уровнях ЭИИМ МС, не превышающих уровни ЭИИМ абонентского оборудования систем 2G/3G/4G, при которых традиционные уровни добровольных экологических рисков пользователей СС в первом приближении могут считаться приемлемыми. Однако планируемое многократное увеличение пространственной плотности источников излучений (до 0,1 ед./м<sup>2</sup> в системах 4G, до 1 ед./м<sup>2</sup> в системах 5G и до 10 ед./м<sup>2</sup> в системах 6G [2, 14]) существенно увеличивает опасность вынужденных экологических рисков для населения, связанных с многократным увеличением суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого всей совокупностью ЭМИ БС и МС СС.

## Заключение

При полномасштабном внедрении технологий, сетей и услуг 4G/5G/6G для обеспечения приемлемых уровней электромагнитной безопасности населения и электромагнитной экологии среды обитания необходимо выполнение следующих условий:

1. Реализация всех беспроводных сервисов, ориентированных на экстремально высокие скорости беспроводной передачи информации (потокowego видео, дополненной и виртуальной реальности, тактильного Интернета и т.п.), при минимальной дальности связи, не превышающей единиц-десятков метров, при которой обеспечиваются условия РРВ в свободном пространстве и требуется минимальный энергетический запас радиолинии  $D_{\Sigma}$ .

2. Разработка и внедрение более глубоких и объективных подходов к оценке электромагнитной безопасности радиосетей 4G/5G/6G для населения, учитывающих чрезвычайно высокую пространственную плотность стационарных и мобильных источников ЭМИ и их массовое одновременное воздействие на различные группы населения в различных условиях с образованием ЭМФ, интенсивность которого связана с суммарной территориальной плотностью беспроводного трафика, размерами зон обслуживания БС, направленностью ЭМИ БС и МС, спектральной эффективностью РК СС, качеством частотного планирования (обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС)) и, в целом, энергетической избыточностью РК СС.

3. Ревизия крайне оптимистичных концепций и сценариев развития систем 5G/6G, фактически направленных на замену существующих проводных технологий и систем информационного обслуживания общества беспроводными, в части объективного анализа их электромагнитной безопасности для населения, включая поддержку использования в бизнес-сценариях 5G альтернативных (волоконно-оптических, квазиоптических и т.п.) технических решений высокоскоростной передачи информации, не связанных с использованием радиочастотных ЭМИ; стимулирование использования в сетях 5G/6G лазеров, волоконно-оптических линий связи и т.п.

4. Реализация низко- и среднескоростных технологических сервисов IoT, требующих относительно большой дальности связи и относительно узких полос частот РК, в выделенных полосах частот нижней части диапазона УВЧ с принятием эффективных мер обеспечения внутрисистемной ЭМС в целях максимально возможного снижения уровней внутрисетевых помех и требуемых уровней ЭИИМ МС.

5. Принимая во внимание неопределенность характеристик оборудования и системных решений 5G/6G, декларативность в определении путей их эволюционирования – проведение комплексных исследований экологичности и безопасности типовых сценариев и вариантов их реализации в условиях достижения декларируемых уровней территориальной плотности беспроводного трафика, территориальной плотности источников ЭМИ, размеров и характера зон обслуживания отдельных БС (с учетом возможной дальности связи и условий РРВ), скоростей и спектральной эффективности передачи информации по РК.

6. В связи с конфликтом интересов [15] при внедрении 5G с реализацией опасных для населения корпоративных рекомендаций ICNIRP, учитывающих только тепловые биоэффекты воздействия ЭМП на человеческий организм, – введение моратория на изменение действующих гигиенических нормативов на ПДУ ЭМП до выполнения комплекса всесторонних независимых научных исследований влияния на здоровье населения ЭМИ оборудования 4G/5G.

## Список литературы / References

1. Characteristics of broadband radio local area networks. Rec. ITU-R M.1450.
2. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083.
3. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Edited by J. Rodriguez. John Wiley & Sons; 2015.
4. Mordachev V.I., Svistunov A.S. [Restrictions of the radio-frequency resource assigned for the GSM cellular network, providing its electromagnetic safety at various levels of radio reception sensitivity and heights of antennas of GSM base stations]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2010;8(54):46-53. (in Russ.)



5. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. *Proc. of the 2018 Int. Symp. "EMC Europe 2018"*, Amsterdam, The Netherlands, Aug. 27-30, 2018: 202-207.
6. Toledo A.F., Turkmani A.M.D. Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz. *Proc. of IEEE Vehicle Technology Conference*, 1992: 633-636.
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.
8. Asplund H., Astely D., Von Butovitsch P., Chapman T., Frenne M., Ghasemzadeh F., Hagstrom M., Hogan B., Jongren G., Karlsson J., Kronstedt F., Larsson E. *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. Bridging the Gap Between Theory and Practice*. Academic Press; 2020.
9. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. Report ITU-R M.2412.
10. Ahmadi S. 5G NR. *Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*. Academic Press; 2019.
11. Tikhvinsky V., Koval V., Bochechka G., Babin A. [*Iot/M2M Networks: Technologies, Architecture and Applications*]. Moscow: Media Publisher; 2017. (in Russ.)
12. Mordachev V.I. [Correlation between the potential electromagnetic pollution level and the danger of COVID-19. 4G/5G/6G can be safe for people]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(4):96-112. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-4-96-112. (in Russ.)
13. 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, Sept. 4-8, 2017 (paper No. 64).
14. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Fan P. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 2019;14(3):28-41.
15. Hardell L., Carlberg M. Health risks from radiofrequency radiation, including 5G, should be assessed by experts with no conflicts of interest. *Oncology Letters*. 2020;20(15):1-11. DOI: 10.3892/ol.2020.11876.

#### Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

Mordachev V.I., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### 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, www.emc.bsuir.by  
Мордачев Владимир Иванович

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17-293-84-38;  
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by  
Mordachev Vladimir Ivanovich