



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-5-15>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕМЕНТОВ БИОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 1. ПРЕДПОСЫЛКИ

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ

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

Аннотация. Рассматриваются предпосылки создания комплексной защиты населения и технических средств критической инфраструктуры от воздействия радиочастотных электромагнитных полей оборудования мобильной связи 5G. Необходимость ее создания обусловлена ожидаемым широким использованием в системах мобильной связи 5G/6G режима временного дуплекса TDD с импульсной эквивалентной изотропно излучаемой мощностью, на один-два порядка превышающей таковую базовых станций мобильной связи в традиционном режиме частотного дуплекса FDD с квазинепрерывными радиочастотными электромагнитными полями. Существующая практика определения защитных зон и зон ограничения застройки по средним значениям плотности потока энергии радиочастотных электромагнитных полей не позволяет защитить от них ни технические средства и объекты критической инфраструктуры (восприимчивость которых к полям определяется мгновенными значениями их напряженности), ни население в силу их существенно более высокой биоагрессивности по сравнению с квазинепрерывными радиочастотными электромагнитными полями FDD.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, 6G, технические средства, объекты критической инфраструктуры, население, электромагнитная безопасность, электромагнитная совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Комплексная электромагнитная защита элементов биосферы. Часть 1. Предпосылки / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 4. С. 5–15. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-5-15>.

INTEGRATED ELECTROMAGNETIC PROTECTION OF BIOSPHERE ELEMENTS. PART 1. PREREQUISITES

VLADIMIR MORDACHEV, ALIAKSANDR SVISTUNOU

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

Abstract. The article examines the prerequisites for developing a comprehensive system for protecting the population and critical infrastructure equipment from exposure to radiofrequency electromagnetic fields emitted by 5G mobile communications equipment. The need for this system stems from the anticipated widespread use of TDD (time-doubled duplex) mode in 5G/6G mobile communications systems, with a pulsed equivalent isotropically radiated power one to two orders of magnitude higher than that of mobile base stations operating in traditional (frequency-doubled duplex) mode with quasi-continuous radiofrequency electromagnetic fields. The current practice of defining protective zones and development restrictions based on average values of the energy flux density of radiofrequency electromagnetic fields does not provide protection for either critical infrastructure equipment and facilities (whose susceptibility to these fields is determined by their instantaneous field strengths) or the population, due to their significantly higher bioaggressiveness compared to quasi-continuous FDD (frequency-doubled duplex) radiofrequency electromagnetic fields.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, 6G, technical equipment, critical infrastructure facilities, population, electromagnetic safety, electromagnetic compatibility.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Mordachev V., Svistunou A. (2026) Integrated Electromagnetic Protection of Biosphere Elements. Part 1. Prerequisites. *Doklady BGUIR*. 24 (4), 5–15. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-5-15> (in Russian).

Введение

Интенсивное развитие беспроводных технологий и услуг и их проникновение во все сферы человеческого бытия сопровождаются высокими темпами насыщения среды обитания множеством технических средств (ТС) – источников радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП РЧ). В соответствии с декларациями Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (ITU-R) пространственная плотность этих ТС (Connection density) будет увеличиваться на порядок каждые 10 лет: от 10^5 ТС/км² в системах мобильной связи (МС) 4G (IMT-Advanced) до 10^6 ТС/км² в 5G (IMT-2020) и до 10^7 – 10^8 ТС/км² в 6G (IMT-2030). При этом рост средней территориальной плотности беспроводного трафика (ATC – Area Traffic Capacity) от поколения к поколению МС каждые 10 лет будет увеличиваться на два порядка – от 10^5 в сетях 4G до 10^7 бит/с/м² в 5G и до 10^9 бит/с/м² в 6G [1–4].

Эти процессы, несмотря на совершенствование беспроводных технологий, включая применение ММО, не сопровождаются подобным же ростом спектральной эффективности радиоканалов МС, которая определяет необходимую энергетику ЭМП РЧ в системах МС (рост лишь в 3 раза в процессе эволюции МС 4G→5G и в 3–5 раз – для 5G→6G). Поэтому прогнозируемый рост АТС неизбежно приведет к весьма существенному изменению физических характеристик среды обитания – к росту на многие порядки уровней ее антропогенного радиочастотного электромагнитного загрязнения, что представляет реальную опасность для населения.

Осознание этой опасности произошло достаточно давно, еще до начала массового применения МС. В результате были определены физические границы диапазонов воздействия ЭМП РЧ, вызывающих термическое поражение биологических тканей. В [5] обозначены граничные уровни (20–40 Вт/кг) удельной поглощенной мощности (SAR – Specific Absorption Rate) для диапазона частот 0,1 МГц–6,0 ГГц и плотности потока мощности (энергии) 200–400 Вт/м² для диапазона частот 6–300 ГГц. С понижающим коэффициентом ≥ 10 эти уровни положены в основу рекомендуемых ICNIRP «тепловых» предельно допустимых уровней (ПДУ) ЭМП РЧ для населения, при которых термическое поражение биотканей исключается: 10 Вт/м² (1000 мкВт/см², 61 В/м) в диапазоне частот 0,1 МГц–6,0 ГГц, 20 Вт/м² (2000 мкВт/см², 87 В/м) в диапазоне 6–30 ГГц и 40 Вт/м² (4000 мкВт/см², 122 В/м) в диапазоне 30–300 ГГц. Эти рекомендации принимаются во внимание во многих странах, где существует эффективная независимая юридическая защита населения от воздействия ЭМП РЧ, однако в США их использование ограничено судебным решением [6].

Далее начали обнаруживаться так называемые нетепловые эффекты воздействия ЭМП РЧ на нервную, репродуктивную, сердечно-сосудистую и другие системы организма человека, проявляющиеся при уровнях ЭМП РЧ на несколько порядков ниже уровней их теплового воздействия. Эти эффекты в детско-подростковом возрасте проявляются в ослаблении памяти, снижении внимания, умственных и познавательных способностей, в раздражительности, нарушении сна, склонности к стрессорным реакциям, повышении эпилептической готовности. Возможные отдаленные последствия воздействий ЭМП РЧ у взрослых – опухоли мозга, слухового и вестибулярных нервов (в возрасте 25–30 лет), болезнь Альцгеймера, приобретенное слабоумие, депрессивный синдром и другие проявления дегенерации нервных структур головного мозга (в возрасте 50–60 лет) [7–9]. В результате во многих странах были приняты «нетепловые» гигиенические нормативы (ПДУ ЭМП РЧ) в пределах 2,5–90,0 мкВт/см² (0,025–0,900 Вт/м, 3,1–18,4 В/м) и даже ниже [10].

Поскольку нетепловые эффекты и отдаленные последствия воздействия ЭМП РЧ на население не могут наблюдаться непосредственно и обнаруживаются лишь статистической обработкой данных о состоянии здоровья, самочувствии и проблемах поведения людей, в корпоративных интересах объективность их существования в документах ICNIRP отрицается, несмотря на большое число научных публикаций, доказывающих их существование. Результат – перманентный конфликт интересов [11, 12], связанный с очевидным ростом затрат на создание сетей при ужес-

тчении требований к ПДУ ЭМП РЧ и фактически являющийся конфликтом интересов телекоммуникационного бизнеса и населения.

Такой конфликт может быть эффективно преодолен с использованием результатов [13, 14], свидетельствующих о том, что существенное усложнение электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) МС 4G/5G, представляет реальную опасность не только для населения, но и для большинства видов ТС, функционирование которых не связано с использованием ЭМП РЧ, включая ТС объектов критической инфраструктуры. Оказалось, что диапазон значений ПДУ ЭМП РЧ для населения 3–18 В/м, учитывающих опасность нетепловых эффектов воздействия ЭМП РЧ на население с учетом долговременных последствий, практически совпадает с диапазоном значений ПДУ ЭМП РЧ 1–20 В/м для большинства видов ТС критической инфраструктуры (промышленности, транспорта, энергетики, здравоохранения, коммунального хозяйства и др.) при воздействии ЭМП РЧ по порту корпуса ТС.

Безопасность населения оценивается по средним уровням электромагнитного воздействия (усреднение за ≥ 6 мин), а для ТС опасны мгновенные значения. Для сетей МС 4G/5G с технологией частотного дуплекса (FDD), при которой используются квазинепрерывные ЭМП РЧ, разница между средними и мгновенными значениями относительно невелика (соответствует значению пик-фактора сигнала), поэтому санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и зоны ограничения застройки (ЗОЗ), границы которых определены по средним уровням ЭМП РЧ, защищают и ТС инфраструктуры. Однако в системах 4G/5G начинают активно применять технологию временно-го дуплекса (TDD), в которой используются импульсные сигналы. Для этих сигналов среднее и мгновенное значения могут отличаться примерно в 100 раз, и защита населения на основе ПДУ для средних уровней ЭМП РЧ защищать критическую инфраструктуру уже не будет, так как радиусы СЗЗ/ЗОЗ будут в 10 раз меньше соответствующих защитных зон для БС 5G TDD. Последствия подобного развития могут быть катастрофическими, поскольку нормативно-правовые акты, регламентирующие определение защитных зон и ЗОЗ для ТС и объектов критической инфраструктуры по отношению к БС МС, использующих режим TDD, отсутствуют.

Здесь следует принять во внимание, что импульсные сигналы существенно более биоагрессивны. Согласно [7], – в 40–100 раз. Сегодня в ряде стран приняты ПДУ для ЭМП импульсных радиолокационных систем (РЛС) диапазонов УВЧ/СВЧ, по средним уровням ЭМП РЧ за период обзора в десятки раз меньше ПДУ для непрерывных ЭМП РЧ. Подобные гигиенические нормативы для импульсных ЭМП РЧ с режимом TDD МС отсутствуют. Требуются соответствующие независимые медико-биологические исследования для их обоснования, но до их принятия могут быть предложены временные нормативы, основанные на признании подобия биоактивности импульсных сигналов РЛС и МС.

Очевидно, что ограничение на использование БС 5G с режимом TDD, в которых могут применяться активные фазированные антенные решетки (АФАР) с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) до 100 кВт [15], что на два порядка больше ЭИИМ базовых станций 5G в «традиционном» режиме FDD, будет определяться требованиями безопасности ТС и объектов инфраструктуры, выполнение которых обеспечит и безопасность населения. Для технологии TDD МС с импульсными ЭМП РЧ использование «тепловых» нормативов [5] воздействия ЭМП РЧ на население теряет смысл. Эти нормативы со средними уровнями ЭМП РЧ 10–40 Вт/м² (60–120 В/м) будут соответствовать импульсам ЭМП РЧ с амплитудами до 600–1200 В/м, что выходит за рамки разумного.

Таким образом, относительно узкая концепция обеспечения безопасности населения на основе определения СЗЗ и ЗОЗ в условиях интенсивно нарастающего электромагнитного загрязнения среды обитания нуждается в расширении. Ее целесообразно обобщить на обеспечение электромагнитной безопасности биосферы в целом, включая безопасность населения и техносферы – технических сооружений, объектов и оборудования, создаваемых и используемых человеком. Защита техносферы (в частности, ее важнейшего элемента – критической инфраструктуры общества) автоматически защитит и население, и здесь традиционный конфликт интересов [11, 12] устраняется объективно, поскольку критерии нарушения работы ТС из-за воздействия ЭМП РЧ систем 4G/5G очень конкретны, и игнорировать эти нарушения невозможно.

Цель авторских исследований – систематизация совокупности основных факторов, определяющих актуальность проблемы электромагнитной безопасности населения и ТС к воздействию импульсных ЭМП РЧ МС, для углубления и расширения аргументации в пользу обеспечения комплексной электромагнитной защиты биосферы в условиях роста электромагнитного загрязнения окружающей среды, обусловленной интенсивным развитием и внедрением беспроводных технологий и услуг и их проникновением во все сферы бытия.

Критерии восприимчивости населения и технических средств к воздействию радиочастотных электромагнитных полей

1. ПДУ ЭМП РЧ, принятые для средних уровней квазинепрерывных ЭМП

В ряде стран нормирование ПДУ ЭМП РЧ на государственном уровне осуществляется с учетом опасности нетепловых эффектов воздействия этих ЭМП на человеческий организм [16], в том числе с учетом опасности данного воздействия для последующих поколений. Значения этих ПДУ находятся в пределах 3,1–18,4 В/м (табл. 1) и распространяются на чрезвычайно широкий диапазон радиочастот, охватывающий все полосы частот МС 4G/5G. В странах, где государственное нормирование ПДУ ЭМП РЧ отсутствует, а защита населения от этих воздействий возложена на судебную систему, рекомендуемые значения ПДУ определяют верхнюю планку допустимой интенсивности воздействия ЭМП РЧ на различные части тела человека (голову, торс, конечности) и связаны с опасностью «грубых» тепловых эффектов этого воздействия; их значения находятся в пределах 1000–4000 мкВт/см² (61–122 В/м).

Таблица 1. Предельно допустимые уровни радиочастотных электромагнитных полей
в разных странах (по состоянию на 2021 г. [10])

Table 1. Maximum permissible levels of radio frequency electromagnetic fields
in various countries (as of 2021 [10])

Страна	ПДУ, Вт/м ² /мкВт/см ² (В/м)	Страна	ПДУ, Вт/м ² /мкВт/см ² (В/м)
Болгария ¹	0,01/1 (1,9)	Китай	0,4/40 (12,3)
Беларусь, Литва, Венгрия, Италия, Казахстан, Россия, Украина, Швейцария	0,1/10 (6,1)	Люксембург	0,45/45 (13,0)
		Турция	0,56/56 (14,5)
		Узбекистан	0,025/2,5 (3,1)
Израиль, Индия	0,9/90 (18,4)	Чили ¹	0,1/10 (6,1)

¹Нижние пределы диапазона нормированных значений.

2. ПДУ ЭМП РЧ, принятые для средних уровней импульсных ЭМП РЛС

Для случаев облучения от антенн РЛС, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20, гигиеническими нормативами России и Беларуси предусмотрены ПДУ ЭМП РЧ этих РЛС в моменты облучения 25 и 100 мкВт/см² соответственно [17, 18]. Если средний уровень ЭМП РЛС в режиме сканирования в точке наблюдения равен ПДУ, то средний уровень ЭМП РЛС в этой точке за период кругового обзора примерно 6 мин, принятый при контроле квазинепрерывных ЭМП РЧ, будет меньше ПДУ на отношение $360^\circ/\Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС по азимуту. В табл. 2 приведены характеристики ряда РЛС (отечественных и зарубежных), позволяющие это отношение оценить, а также расчетные ПДУ, средние за период обзора, при облучении с ПДУ, принятым для РЛС.

Для приведенных в табл. 2 РЛС соотношение максимального (за время облучения) и среднего (за период обзора) уровней ЭМП РЧ в точке наблюдения соответствует скважности облучения ею этой точки (отношению $360^\circ/\Delta\alpha$), принимающей значения 130–225. Таким образом, ПДУ по среднему уровню импульсных ЭМП РЛС за период обзора принимают значения в интервале 0,11–0,75 мкВт/см², что близко к оценке [7] и может служить аргументом в пользу предположения об определенном подобии воздействия импульсных сигналов МС и РЛС на население.

Таблица 2. Характеристики облучения точки наблюдения антеннами радиолокационных станций в режиме кругового обзора

Table 2. Characteristics of the irradiation of the observation point by radar antennas in the all-round scanning mode

Тип РЛС	Обзор, об./мин	Ширина луча по азимуту $\Delta\alpha$, град.	Частота повторения, имп./с	Ширина импульса, мкс	Количество импульсов/время облучения, с	Расчетные ПДУ, мкВт/см ² (В/м), для ПДУ РЛС	
						25 мкВт/см ²	100 мкВт/см ²
AN/TPS-32	6	2,15°	920–2650	30	55–158/0,06	0,15 (0,75)	0,6 (1,5)
AN/FPS-117	5–6	2,2–2,7°	241	51/410 ¹	15–22/0,06–0,09	0,15–0,19 (0,75–0,85)	0,6–0,75 (1,5–1,7)
AN/TPS-75	6,5	1,6°	235–275	6,8	58–68/0,04	0,11 (0,64)	0,44 (1,3)
AN/TPS-63	6–15	2,7°	300–750	41	23/0,03–0,075	0,19 (0,85)	0,75 (1,7)
AN/TPS-68	6	1,6°	250–275	6,4	11–12/0,045	0,11 (0,64)	0,44 (1,3)
19Ж6	6, 12	2,0°	750	12	21–42/0,03–0,06	0,14 (0,73)	0,56 (1,5)
П-37	3, 6	2,0°	375, 750	1,2	42/0,06–0,11	0,14 (0,73)	0,56 (1,5)
РСР 6М2	10	2,5°	500	1,2	21/0,04	0,17 (0,80)	0,69 (1,6)

¹В современных РЛС с внутриимпульсной модуляцией ширина импульса может достигать сотен микросекунд.

3. Характеристики импульсных сигналов БС 4G/5G в режиме временного дуплекса

Типовая временная реализация сигнала TDD при передаче данных по нисходящей линии связи (downlink) в сетях 4G/LTE представляет собой цикл радиокадров длительностью 10 мс, которые делятся на подкадры передачи данных длительностью 1 мс. Передача данных может выполняться как в пределах длительности подкадра (в течение которого передается 12 или 14 OFDM-символов), так и в течение более короткого интервала времени, соответствующего одному (66,7 мкс) либо нескольким OFDM-символам [19] в пределах длительности подкадра. Предусмотрено несколько конфигураций назначения подкадров для передачи информации downlink и приема информации от абонентского терминала (uplink) с различным отношением количества подкадров для передачи и приема [20, с. 19]. При передаче большого объема данных это отношение может составлять 8:1, а в случае передачи относительно малого объема данных – 2:6 в пределах радиокадра. Типовая осциллограмма импульсного сигнала downlink приведена в [19, с. 247].

В системах 5G для организации передачи данных downlink используется более развитая структура радиокадра с множеством конфигураций назначения символов для передачи и приема в пределах временного слота [21, с. 215]. Радиокадр также включает в себя подкадры длительностью 1 мс, содержащие один или несколько временных слотов, но для передачи данных в рамках различных услуг, например, услуг сверхнадежной связи с низкими задержками URLLC, каждый подкадр может делиться на временные слоты длительностью в несколько раз меньшей, чем длительность подкадра (1 мс).

На рис. 1 приведены осциллограммы [22] сигнала TDD БС 5G диапазона 3,4–3,8 ГГц: *a* – длительностью 40 мс, соответствует отсутствию передачи данных по радиоканалу и содержит только импульсы синхронизации (SSB) и опорных сигналов (RS), обозначенный интервал 20 мс соответствует периоду передачи сигналов синхронизации; *b* – в радиоканале при его максимальной загрузке; *c* – длительностью 10 мс (иллюстрируется один из возможных вариантов последовательности импульсов синхронизации (S), подкадров downlink (D) и uplink (U) конфигурации DDSU радиоканала TDD 5G).

Структура импульсных последовательностей в радиоканалах 4G/5G TDD существенно зависит от загрузки радиоканала, соотношения объемов нисходящего и восходящего трафиков, количества одновременно обслуживаемых абонентов, вида организации направленности передачи данных БС↔АТ (фиксированная многолучевая структура сектора обслуживания БС, адаптивный многолучевой режим Beamforming 3D Massive MIMO). При максимальной загрузке радиоканала скважность импульсов в нем приближается к единице, что соответствует уменьшению разницы между средним уровнем сигнала и его уровнем в импульсе при практической независимости последнего от загрузки радиоканала (рис. 1).

Используя информацию [23] о типовых сценариях передачи данных по нисходящему радиоканалу 5G TDD, можно косвенно определить скважность сигнала обслуживания АТ. В зависимости от средней скорости передачи, для большинства сценариев равной 4–30 Мбит/с, при средней

скорости передачи данных по радиоканалу 5G 1090 Мбит/с косвенная оценка скважности обслуживания АТ, согласно [23], соответствовала диапазону 35–270, что охватывает диапазон значений скважности облучения РЛС, приведенных в табл. 2 ($360^\circ/\Delta\alpha = 130\text{--}225$). Пиковая скорость передачи данных (максимальная достижимая скорость передачи данных для одного АТ в идеальных условиях) определена на уровне 20 Гбит (5G) и 1000 Гбит/с (6G) [1, 4], для TDD это косвенно может соответствовать возможной скважности обслуживания до сотен единиц.

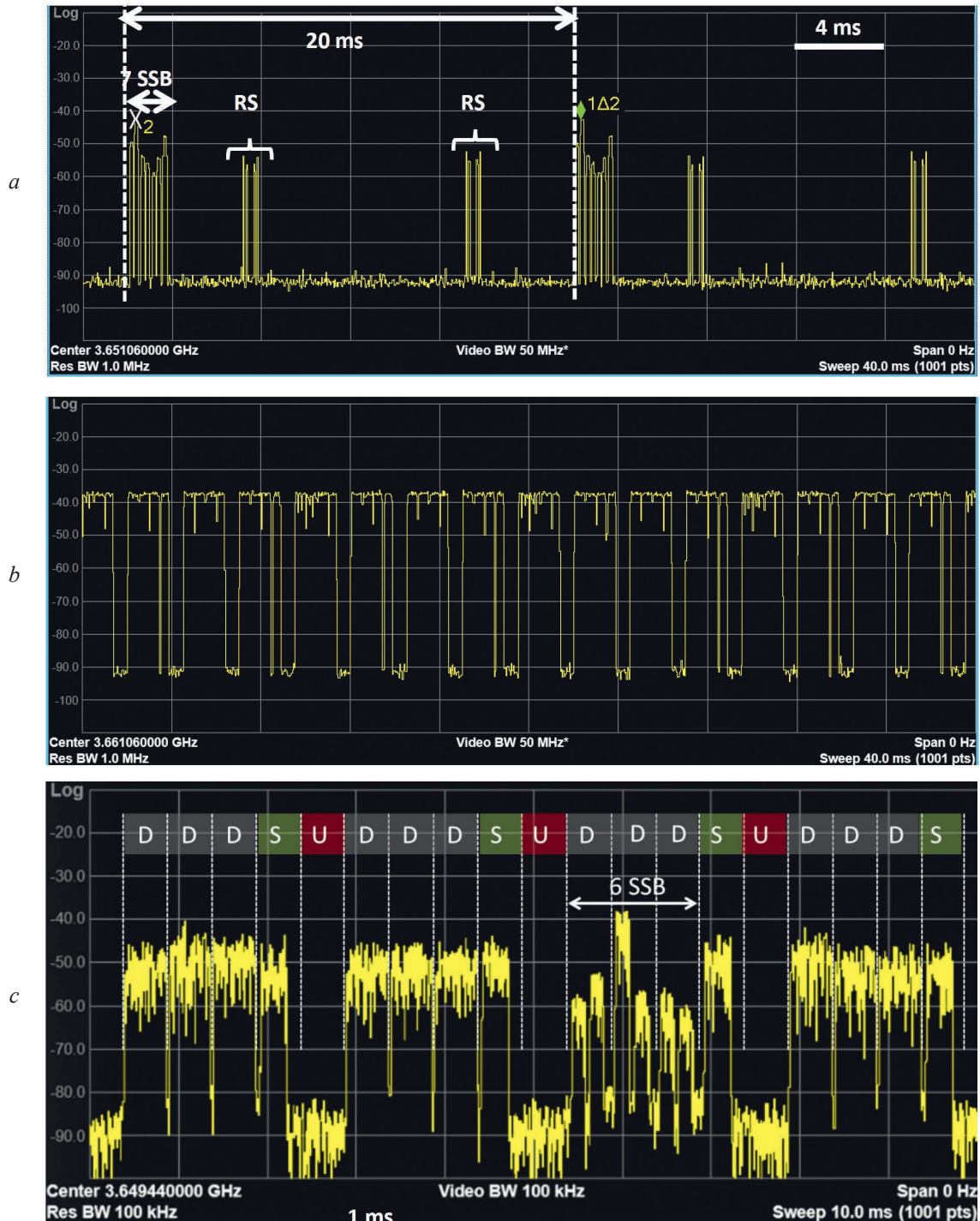


Рис. 1. Осциллограммы сигналов TDD 5G диапазона 3,4–3,8 ГГц
Fig. 1. Waveforms of TDD 5G signals of the 3.4–3.8 GHz range

В целом, несмотря на подобие импульсов РЛС и БС TDD 5G (длительности импульсов и их фронтов), в силу весьма значительных различий вида и параметров импульсных последовательностей ЭМП РЧ TDD в точке наблюдения при значительном различии в интенсивности

нисходящего трафика (рис. 1, а, б) подобие импульсных последовательностей ЭМП РЧ этих систем ограничено возможным различием в скажности воздействия, которая при передаче очень больших объемов информации отдельным АТ в часы наибольшей нагрузки в сети МС может быть меньше минимального значения 20, оговоренного в [17, 18].

Полосы частот МС 4G/5G, предназначенные для использования в режиме временного дуплекса TDD, являются преобладающей частью объема радиочастотного ресурса (спектра), выделенного для систем МС. Эти полосы частот приведены в табл. 3 с указанием их принятой нумерации и границ в соответствии с [24, 25]. Следует отметить, что практически все полосы частот диапазонов СВЧ и КВЧ, выделенные в диапазонах FR1 и FR2 для развития 5G NR, в частности, полосы n77–n79, n96, n102, n104, n277–n263, предназначены именно для импульсного режима TDD.

Таблица 3. Полосы частот мобильной связи 5G, предназначенные для использования в режиме TDD

Table 3. 5G NR frequency bands designated for use in TDD mode

Номер полосы частот	Полоса частот TDD 5G, МГц	Номер полосы частот	Полоса частот TDD 5G, МГц
Диапазон частот FR1 5G (410–7125 МГц)		Диапазон частот FR1 5G (410–7125 МГц)	
n34	2010–2025	n90	2496–2690
n38	2570–2620	n96	5925–7125
n39	1880–1920	n101	1900–1910
n40	2300–2400	n102	5925–6425
n41	2496–2690	n104	6425–7125
n46	5150–5925	Диапазон частот 5G FR2 (24,25–71,0 ГГц)	
n48	3550–3700	n257	26 500–29 500
n50	1432–1517	n258	24 250–27 500
n51	1427–1432	n259	39 500–43 500
n53	2483,5–2495,0	n260	37 000–40 000
n77	3300–4200	n261	27 500–28 350
n78	3300–3800	n262	47 200–48 200
n79	4400–5000	n263	57 000–71 000

4. ПДУ ЭМП РЧ, принятые для ТС различного назначения

В [14] детально рассмотрены требования множества международных стандартов к восприимчивости ТС различных видов при воздействии ЭМП РЧ по порту корпуса. Исходя из регламентируемых значений ПДУ ЭМП РЧ, все множество видов ТС разделено на восемь групп в зависимости от уровня их восприимчивости к воздействию ЭМП РЧ, нормируемого в отдельных полосах частот для каждого вида ТС. Краткая информация об этих требованиях, касающихся большинства видов ТС, в том числе используемых на объектах критической инфраструктуры, приведена в табл. 4.

Таблица 4. Классификация технических средств по восприимчивости к воздействию радиочастотных электромагнитных полей по порту корпуса

Table 4. Classification of technical equipment by susceptibility to the exposure of radio frequency electromagnetic fields by the housing port

№ группы ТС; ПДУ ЭМП РЧ, В/м	Полоса частот, ГГц, с ПДУ ЭМП РЧ для ТС группы	Стандарт, определяющий ПДУ ЭМП РЧ для ТС группы
№ 1; 0,2	0,08–1,00	EN 50083-2
№ 2; 1	0,08–1,00; 1,4–2,0; 2,0–2,7; 2,7–6,0; 0,790–0,862	IEC 61000-6-5, IEC 60870-2-1, IEC 61326-1, ГОСТ 32137, EN 50491-5-2, EN 50270, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, IEC 62041, EN 50083-2
№ 3; 2	0,08–1,00; 0,95–3,50; 1,4–2,0	EN 50083-2, IEC 60118-13, EN 50270
№ 4; 3	0,08–1,00, $0,9 \pm 0,0054$; $0,92 \pm 0,001$; 0,47–0,79; 0,80–0,96; 1,0–2,7; 0,08–2,50; 0,08–0,80; 0,96–1,00; 1,4–2,0; 1,88–1,96; 0,08–2,50; 2,0–2,7	IEC 61000-6-5, ГОСТ 30379, IEC 61326-1, EN 50065-2-1, EN 50065-2-2, EN 50412-2-1, IEC 60601-1-2, EN 301 489-27, EN 301 489-31, IEC 60870-2-1, IEC 60118-13, IEC 61204-3, EN 50491-5-2, IEC 62041, IEC 61439-1, IEC 60947-5-3, IEC 61326-3-1, IEC 61326-3-2, EN 300 386, EN 301 489-22, EN 301 489-19, ETSI EN 301 489-1, EN 50270, IEC 61439-1, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, ГОСТ 32137, IEC 62040-2, IEC 61547, ISO 7176-21, CISPR 24, CISPR 14-2, EN 12016, IEC 62236-4, UNE EN50121-4

Окончание табл. 4
Ending of Tab. 4

№ группы ТС; ПДУ ЭМП РЧ, В/м	Полоса частот, ГГц, с ПДУ ЭМП РЧ для ТС группы	Стандарт, определяющий ПДУ ЭМП РЧ для ТС группы
№ 5; 10	0,08–1,00; 0,80–0,96; 0,9 ± 0,005; 1,4–2,7; 0,45 ± 0,5 %; 1,85 ± 5 %; 2,15 ± 5 %; 0,166–1,000; 1,710–1,784; 1,88–1,96; 0,08–2,50; 1,4–2,0; 0,08–2,00	IEC 61000-6-5, IEC 60870-2-1, IEC 60255-26, IEC 62026-1, EN 50065-2-2, EN 50065-2-3, EN 50412-2-1, IEC 61326-3-1, IEC 61326-3-2, IEC 61000-6-2, IEC 61800-3, IEC 61131-2, IEC 60974-10, IEC 62135-2, EN 50293, EN 12016, EN 50370-2, ГОСТ 30379, IEC 60601-1-2, EN 301 489-27, EN 301 489-31, EN 50491-5-2, IEC 62041, IEC 60947-5-3, IEC 61439-1, EN 300 386, EN 301 489-22, ETSI EN 301 489-34, EN 301 489-14, EN 301 489-11, IEC 62040-2, IEC 61204-3, ГОСТ 32137, EN 50270, IEC 62052-11, IEC 61326-1, EN 12016, IEC 62236-4, UNE EN50121-4
№ 6; 20	0,08–1,00; 0,8–1,0; 0,026–2,500	IEC 60947-5-3, IEC 61326-3-1, ISO 7176-21, EN 12016, IEC 62236-4, UNE EN50121-4
№ 7; 30	0,08–1,00; 1,4–2,0; 0,02–1,00; 0,166–1,000; 1,710–1,784	IEC 60870-2-1, ГОСТ 32137, ISO 13766, ISO 14982, EN 12016, IEC 62052-11
№ 8; 100	0,02–1,00	ISO 13766
Примечание – Фоном выделены полосы, включающие полосы частот TDD MC 4G/5G.		

Контроль соответствия ТС требованиям стандартов, указанных в табл. 4, производится с использованием гармонических либо модулированных испытательных воздействий. Восприимчивость ТС к воздействию ЭМП РЧ определяется не средними, а мгновенными значениями их напряженности. Это подтверждается, в частности, результатами испытаний на восприимчивость ТС медицинского мониторинга к воздействию немодулированных и модулированных ЭМП РЧ [26], свидетельствующими о том, что уровень ЭМП РЧ, соответствующий порогу восприимчивости этих ТС к амплитудно-модулированному испытательному воздействию, в полосе частот 0,2–1,0 ГГц оказался на 3–12 дБ меньше, чем к немодулированному воздействию, при весьма сложной зависимости этих уровней от частоты.

Характеристики электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями базовых станций и абонентских терминалов мобильной связи

Имеется большое количество публикаций, содержащих результаты измерений и оценок уровней электромагнитного фона (ЭМФ) и уровней ЭМП РЧ отдельных БС и АТ МС различных поколений, позволяющих судить о степени их опасности для населения и ТС.

1. В [27] содержится обзор экспериментальных и расчетных данных об уровнях ЭМФ, создаваемого системами МС в период, предшествующий внедрению технологий 4G/5G, в странах Европы. Максимальные средние уровни ЭМФ в городах получены в пределах 1–4 В/м, но в некоторых случаях фиксировались уровни ЭМФ 6–20 В/м и более.

2. В [22] приведены результаты измерений средних уровней импульсных ЭМП РЧ 5G в радиоканалах диапазона 3,4–3,8 ГГц в 10 городах Франции. Даже в отсутствие трафика только за счет передачи импульсов синхронизации (рис. 1, а) усредненный по множеству наблюдений в 43 сайтах средний уровень ЭМФ в полосе частот радиоканала шириной 100 МГц увеличивался с <0,01 до 0,06 В/м при максимальном значении 0,36 В/м, что при наблюдаемой на рис. 1, а скажностности соответствует импульсам до 10 В/м. При максимальной загрузке радиоканала средний уровень ЭМП РЧ в полосе частот радиоканала достигал 8–9 В/м, что при скажностности, характерной для реализаций на рис. 1, б, с, соответствует импульсным значениям ≥10 В/м.

3. В [28] приведены результаты измерений уровней ЭМФ, создаваемого излучениями МС 5G в 2023 г. в четырех странах Европы. Максимальные средние уровни ЭМФ составили 1,8–2,3 мкВт/см²; в сайтах с преобладанием TDD 5G (3,6 ГГц) средние уровни составили 0,8–1,1 мкВт/см², что при преобладании импульсной компоненты ЭМФ соответствует импульсам до 17–20 В/м.

4. В [29] приведены результаты измерений уровней ЭМФ, создаваемого излучениями БС DCS-1800/LTE-1800, UMTS и LTE-2600 на территории Дальневосточного федерального университета в мае 2021 г. Средний уровень ЭМФ вне помещений зафиксирован в преде-

лах 2,0–4,5 мкВт/см² (2,7–4,1 В/м), на отдельных контрольных точках фиксировались уровни до 15 мкВт/см² (7,5 В/м), превышающие принятые ПДУ.

5. Результаты измерений уровней ЭМП РЧ [23] в ФРГ в «пятнах» лучей БС с АФАР Massive MIMO Beamforming при передаче информации по радиоканалам 4G/5G в полосе частот от 816 до 3655 МГц на расстояния 48–327 м от БС свидетельствуют о том, что на таких расстояниях при максимальных скоростях передачи данных 1,0–1,6 Гбит/с по радиоканалу 4G/5G средняя напряженность ЭМП РЧ TDD в «пятне» достигала 3–5 В/м.

6. В [30] результаты измерений суммарных уровней ЭМП РЧ, создаваемых фрагментом радиосети 5G в 16 точках наблюдения на территории кампуса Политехнического университета Валенсии, свидетельствуют о том, что суммарные средние уровни ЭМП РЧ в этих точках находятся в пределах 2,2–436,0 мкВт/см² (2,9–40,5 В/м).

7. Результаты измерений в Малайзии средних уровней ЭМП 5G TDD [31] миллиметрового диапазона (29,5 ГГц) у земной поверхности: максимальный средний уровень ЭМП составил 5,71 В/м, что соответствует амплитуде импульса до 50–60 В/м.

8. Результаты оценок [32, 33] и измерений [34, 35] свидетельствуют о том, что излучения АТ могут вносить существенный вклад в суммарную интенсивность ЭМФ. Этот вклад сопоставим со вкладом излучений БС, а в местах пространственной концентрации АТ может играть доминирующую роль в электромагнитном загрязнении среды обитания.

Заключение

1. Изложенные основные факторы, определяющие актуальность проблемы электромагнитной безопасности населения и технических средств к воздействию импульсных радиочастотных электромагнитных полей мобильной связи, свидетельствуют в пользу создания системы обеспечения комплексной электромагнитной защиты и населения, и критической инфраструктуры как важных элементов биосферы в условиях роста электромагнитного загрязнения окружающей среды, обусловленного интенсивным развитием и внедрением беспроводных технологий и услуг 5G/6G и их проникновением во все сферы бытия. Целесообразность создания системы продиктована единством антропогенного фактора, представляющего опасность и для населения, и для важнейших элементов техносферы, а также единым пространством локализации и близкими критериями восприимчивости к воздействию радиочастотных электромагнитных полей населения и технических средств.

2. Приведенные выше материалы подтверждают:

– адекватность предельно допустимых уровней радиочастотных электромагнитных полей для населения, принятых с учетом опасности нетепловых эффектов воздействия радиочастотных электромагнитных полей на население [16] и одновременно обеспечивающих защиту большинства технических средств от воздействия таких полей мобильной связи FDD;

– неадекватность «тепловых» гигиенических нормативов [5] воздействия радиочастотных электромагнитных полей мобильной связи для населения, использование которых способно быть причиной катастрофических последствий, связанных с массовыми отказами технических средств критической инфраструктуры во всех сферах – в промышленности, транспорте, энергетике, здравоохранении, коммунальном хозяйстве и т. п., особенно при применении в мобильной связи импульсных режимов TDD.

3. Актуальность рассмотренных положений очевидна с учетом расширяющегося применения в системах мобильной связи импульсных режимов TDD. Анализ изложенных в статье факторов и обоснование аргументации в пользу создания подобной системы будут рассмотрены в части 2 данной статьи.

Список литературы / References

1. Recommendation ITU-R M.2083 (09/2015). *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*.
2. Report ITU-R M.2412 (11/2017). *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*.
3. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G. Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.
4. Rec. ITU-R M.2160-0 (11/2023). *Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond*.

5. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). USA, Health Physics Publ. 2020. 118 (5), 483–524.
6. On Petitions for Review of an Order of the Federal Communications Commission. *United States Court of Appeals, Decision No 20-1025, Aug. 13, 2021, Consolidated with 20-1138*.
7. Grigoriev O. A., Zubarev Y. B. (2022) The Effects of Wireless Communication Electromagnetic Energy Influence on Persons: Predictions of the Growth for Conditioned Morbidity, Their Implementation and Problems of Evaluation. *Concepții*. 1 (41), 3–17 (in Russian).
8. Varshavsky A. E. (2022) The Main Factors and Problems of the Transition to a New Generation of Communication Networks 5G. *Concepții*. 1 (41), 18–35 (in Russian).
9. IARC Classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as Possibly Carcinogenic to Humans. *WHO, Press Release, 2011, No 208*.
10. Mordachev V. I. (2022) Refined Analysis of the Correlation Between the Accepted Maximum Permissible Levels of Radio Frequency Electromagnetic Fields for the Population and the Lethality Rate of COVID-19. *Doklady BGUIR*. 20 (1), 55–64. <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/3285>.
11. Hardell L., Carlberg M. (2020) Health Risks from Radiofrequency Radiation, Including 5G, Should Be Assessed by Experts with No Conflicts of Interest. *Oncology Letters*. 20 (15), 1–11. DOI: 10.3892/ol.2020.11876.
12. Buchner K., Rivasi M. (2020) *The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Conflicts of Interest, Corporate Capture and the Push for 5G*. Available: <https://www.michele-rivasi.eu/wp-content/uploads/2020/06/ICNIRP-rapport-FR-FINAL-JUIN-2020.pdf>.
13. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).
14. Mordachev V., Sinkevich E., Svistunou A., Ivanchenko V. (2026) 4G/5G Wireless Systems Radiation Safety for Various Technical Equipment. *Doklady BGUIR*. 24 (2), 14–24. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-14-24> (in Russian).
15. *Nokia AirScale Radio Units Description*. Available: <https://lcom.net/wp-content/uploads/2021/05/Nokia-airscale-5G-radio-description-datasheet-5g.pdf>.
16. Hinrikus H. (2026) *Nonthermal Mechanism of Low-Level Microwave Effect on the Human Brain*. USA, CRC Press. Publ.
17. SanPiN 2.1.8/2.2.4.1383–03. *Sanitary Requirements for the Placement and Operation of Transmitting Radio-Technical Facilities*. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 2003 (in Russian).
18. *Specific Sanitary and Epidemiological Requirements for the Maintenance and Operation of Facilities that Are Sources of Non-Ionizing Radiation*. Approved by Resolution No 360 of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated June 4, 2019 (in Russian).
19. Moray Rumney (2008) *LTE and the Evolution to 4G Wireless – Design and Measurement Challenges*. USA, Agilent Technologies Publ.
20. ETSI TS 136 211 V18.0.2 (2025–08). *LTE: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (3GPP TS 36.211 version 18.0.2 Release 18). Technical Specification*.
21. ETSI TS 138 213 V18.7.0 (2025–07). *5G NR: Physical Layer Procedures for Control (3GPP TS 38.213 version 18.7.0 Release 18). Technical Specification*.
22. Assessment of the Exposure of the General Public to 5G Electromagnetic Waves. Part 2: First Measurement Results on 5G pilots in the 3,400–3,800 MHz Band. *ANFR, April 2020*.
23. Schiffarth A.-M., Ta T. J., Bornkessel C., Schilling L.-M., Hein M., Heberling D. (2025) Definition and Validation of an Exposure Measurement Method for a Typical Load of a Base Station. *Bioelectromagnetics*. 46 (8), 1–13. <https://doi.org/10.1002/bem.70029>.
24. ETSI TS 138 101-1 V15.7.0 (2019–10) *5G; NR; User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.7.0 Release 15). Technical Specification*.
25. *Frequency Bands for 5G NR*. Available: <https://5g-tools.com/5g-nr-frequency-band/?ysclid=mpnnl07b85888848312>.
26. Xue X., Claeys T., Pissort D. (2023) Application of a Testing-to-Failure Approach to the Susceptibility Assessment of Electronic Systems. *Proceedings of the International Symposium “EMC Europe 2023”, Krakow, Poland*.
27. Mordachev V. I. (2018) Verification of the Worst Case Model for the Estimation of Average Intensity of the Electromagnetic Background Created by Base Stations of Cellular Communications. *Doklady BGUIR*. (1), 12–18. <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/942> (in Russian).
28. Deprez K., Stroobandt B., Veludo A. F., Vecsei Z., Necz P. P., Politański P., et al. (2025) 5G RF EMF Spectral Exposure Assessment in Four European Countries. *Bioelectromagnetics*. 46 (6).
29. Statsenko L., Bakhvalova A., Zhmakina I. (2021) Electromagnetic Background on the FEFU Campus on the Russky Island: Instrumental Measurements. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 3 (48), 124–132 (in Russian).

30. Najera A., Villaescusa-Tebar A., Gonzalez-Rubio J., Garcia-Pardo C. (2025) Dual Evaluation and Spatial Analysis of RF-EMF Exposure in 5G: Theoretical Extrapolations and Direct Measurements. *Bioelectromagnetics*. 46 (6). <https://doi.org/10.1002/bem.70020>.
31. Walie S. Q., Salie A., Jaafar K., Allami J. K., Osman A. F. (2022) RF-EMF Exposure Measurement for 5G Over Mm-Wave Base Station with MIMO Antenna. *IEEE Access*. 10, 9048–9058.
32. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background Created by 5G eMBB Systems on Dense Urban Areas. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 12–23 (in Russian).
33. Mordachev V. (2024) Radiofrequency Electromagnetic Pollution of the Habitat Created by Mobile Communications. *Biology Bulletin*. 51 (11), 3481–3495.
34. Chiaraviglio L., Lodovisi C., Bartoletti S., Elzanaty A., Slim-Alouini M. (2024) Dominance of Smartphone Exposure in 5G Mobile Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 23 (3), 2284–2302.
35. Delidimitriou S., Babas D., Manassas A., Wiart J., Samaras T. (2026) RF-EMF Bystander Exposure in the 5G Era Measured Across Various Microenvironments in Greece. *Annals of Telecommunications, Springer*. <https://doi.org/10.1007/s12243-026-01143-2>.

Поступила 27.04.2026

Принята в печать 15.05.2026

Received: 27 April 2026

Accepted: 15 May 2026

Вклад авторов

Мордачев В. И. выполнил обоснование и систематизацию аргументации создания комплексной электромагнитной защиты элементов биосферы, подготовил рукопись статьи.

Свистунов А. С. выполнил анализ характеристик радиочастотных электромагнитных полей TDD 4G/5G, участвовал в обсуждении аргументации, результатов и выводов исследований.

Authors' contribution

Mordachev V. substantiated and systematized the arguments for the development of integrated electromagnetic protection system for the elements of the biosphere and prepared the article.

Svistunou A. performed an analysis of the characteristics of radio frequency electromagnetic fields of TDD 4G/5G, participated in the discussion of the arguments, results and conclusions of the research.

Сведения об авторах

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Свистунов А. С., науч. сотр. НИЛ 1.7, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Mordachev V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment” (Lab. 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Svistunou A., Researcher at the Lab. 1.7, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

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

Address for correspondence

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