CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-5-14

УДК 621.396.218:614.89.086.5

КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕМЕНТОВ БИОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 2. ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ

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

Аннотация. В статье рассматривается проблема реализации комплексной защиты населения и технических средств критической инфраструктуры от воздействия радиочастотных электромагнитных полей оборудования мобильной связи 5G, актуальность которой связана с расширяющимся использованием в системах 5G импульсного режима TDD. Обсуждаются возможности обеспечения такой комплексной защиты элементов биосферы, связанные с расширением существующей системы санитарно-гигиенической паспортизации передающих радиотехнических объектов за счет определения защитных зон и зон ограничения застройки по критериям восприимчивости технических средств к радиочастотным электромагнитным полям и с гигиеническим нормированием восприимчивости населения к радиочастотным электромагнитным полям TDD.

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 2. Проблемы и возможности / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 5–14. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-5-14.

INTEGRATED ELECTROMAGNETIC PROTECTION OF BIOSPHERE ELEMENTS. PART 2. PROBLEMS AND OPPORTUNITIES

VLADIMIR MORDACHEV, ALIAKSANDR SVISTUNOU

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

Abstract. This article examines the problem of implementing comprehensive protection for the population and critical infrastructure equipment from exposure to radiofrequency electromagnetic (RFEM) fields from 5G mobile communications equipment. This problem is relevant due to the expanding use of TDD pulsed mode in 5G systems. The article discusses the potential for providing such comprehensive protection for elements of the biosphere, which involves expanding the existing sanitary and hygienic certification system for transmitting radio facilities by defining protective zones and development restrictions based on the susceptibility of technical equipment to RFEM fields and hygienic regulation of the population's susceptibility to TDD RFEM 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 2. Problems and Opportunities. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 5–14. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-5-14 (in Russian).

Введение

В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованиям процессов усложнения электромагнитной обстановки (ЭМО) при широкомасштабном интенсивном проникновении беспроводных технологий и услуг 4G/5G/6G во все сферы человеческой деятельности и степени опасности этих процессов для здоровья и благополучия населения. Ведутся дискуссии об адекватности «тепловых» (10–40 Вт/м^2) [1] и «нетепловых» (0,025–0,900 Вт/м^2) [2] критериев опасности радиочастотных электромагнитных (ЭМ) воздействий на человеческий организм, наблюдается крайне негативный конфликт между интересами телекоммуникационного бизнеса и интересами населения в данной области [3, 4]. Проводятся исследования, направленные на системный анализ опасности радиочастотных ЭМ полей (ЭМП РЧ) базовых станций (БС) и абонентских терминалов (АТ) систем мобильной связи (МС) 4G/5G и на защиту населения от ЭМ загрязнения среды обитания.

В то же время существует область, которая значительно расширяет горизонты проблемы ЭМ защиты от воздействия ЭМП РЧ МС. Дело в том, что эти ЭМП представляют реальную опасность для огромного количества видов оборудования и объектов, включая оборудование и объекты критической инфраструктуры. Предельно допустимые уровни (ПДУ) ЭМП РЧ для населения, учитывающие опасность нетепловых эффектов их воздействия на человеческий организм с учетом долговременных последствий, принятые в разных странах в пределах 3–18 В/м (2,5–90,0 мкВт/см^2) [5–7], практически совпадают с ПДУ РЧ ЭМП, принятыми в пределах 1–20 В/м для большинства видов технических средств (ТС) критической инфраструктуры (на производстве, на транспорте, в здравоохранении, в сфере управления и т. п.) при воздействии по порту корпуса [7–9] – физической границе ТС, через которую могут проникать внешние ЭМП [10]. Отсутствие до настоящего времени массовых отказов этих ТС и катастрофических последствий, с ними связанных, может быть объяснено тем, что защита населения от излучений БС МС и других радиоэлектронных средств (РЭС) обеспечивается установлением санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон ограничения застройки (ЗОЗ). Присутствие в них людей, деятельность которых не связана с использованием ЭМП РЧ, недопустимо, что одновременно обеспечивает ЭМ защиту ТС и объектов инфраструктуры, поскольку они также должны находиться за пределами СЗЗ и ЗОЗ, чтобы здоровье их персонала не подвергалось опасности.

К сожалению, подобное «равновесие» в ближайшем будущем может быть нарушено. Дело в том, что в соответствии с принятой методологией безопасность населения оценивается по средним уровням ЭМП РЧ (контролируемым с усреднением за 6 мин [11, приложение 10]), а для ТС опасны мгновенные значения этих ЭМП. Для традиционной технологии частотного дуплекса FDD в сетях МС, при которой используются квазинепрерывные ЭМП РЧ, разница между средним и мгновенным значениями относительно невелика (соответствует пик-фактору сигнала), поэтому СЗЗ и ЗОЗ, определяемые по средним уровням ЭМП РЧ, защищают и ТС критической инфрастркутуры. Однако в системах МС 5G начинают активно применять технологию временного дуплекса TDD, в которой используются импульсные сигналы. Для этих сигналов различие средних и мгновенных уровней может достигать 20 дБ, и защита населения по ПДУ для средних уровней ЭМП РЧ защищать критическую инфраструктуру от воздействия импульсных ЭМП РЧ TDD уже не будет, так как вне зависимости от мощности излучения БС МС в режиме TDD радиусы ЗОЗ БС, рассчитываемые и контролируемые по средним уровням ЭМП РЧ TDD 5G, будут до 10 раз меньше значений требуемого пространственного разноса, способного обеспечить защиту ТС от их воздействия. Это соответствует увеличению площади ЗОЗ для ТС и объектов инфраструктуры до 100 раз по сравнению с площадью ЗОЗ для населения. Последствия подобного развития могут быть катастрофическими.

Также нужно принять во внимание, что импульсные сигналы не только более опасны для ТС, но и существенно более биоагрессивны: по ряду оценок – в 40–100 раз [9, 12]. В результате ограничение на использование режима TDD 5G и на характеристики излучений БС, реализующих этот режим с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) до 100 кВт [13] (что на 15–20 дБ превышает ЭИИМ БС 4G/5G в «традиционном» квазинепрерывном режиме FDD), будет определяться требованиями безопасности ТС и объектов критической инфраструктуры по отношению к воздействию импульсных ЭМП РЧ TDD. Соблюдение этих ограничений при определенных условиях может обеспечить также ЭМ безопасность населения.

Следовательно, принятую относительно узкую концепцию обеспечения ЭМ безопасности населения в условиях нарастающего ЭМ загрязнения среды обитания целесообразно расши-

рить ее обобщением на обеспечение ЭМ безопасности биосферы в целом, включая безопасность ее важнейших элементов – населения и техносферы. Защита техносферы – ТС и объектов, создаваемых и используемых человеком (и в первую очередь ТС и объектов критической инфраструктуры), – способна автоматически обеспечить и защиту населения. И здесь вышеупомянутый традиционный конфликт интересов [3, 4] теряет значение, поскольку нарушения работы ТС из-за воздействия ЭМП РЧ, в отличие от их вреда здоровью человека, объективны и воспроизводимы, что исключает их неадекватное толкование.

В [9] изложены и систематизированы основные предпосылки к созданию комплексной системы ЭМ защиты элементов биосферы от воздействия ЭМП РЧ современных и перспективных поколений МС. Цель исследований авторов – анализ этих предпосылок в интересах обоснования элементов концепции комплексной защиты ТС критической инфраструктуры и населения (как элементов биосферы, особо чувствительных к радиочастотному ЭМ загрязнению окружающей среды) от негативного воздействия ЭМП РЧ 4G/5G/6G.

Анализ проблем

Проанализируем проблемы, связанные с созданием комплексной системы ЭМ защиты элементов биосферы от воздействия ЭМП РЧ 5G.

1. Приведенные в [9] результаты экспериментальных оценок уровней электромагнитного фона (ЭМФ) и уровней ЭМП РЧ БС и АТ в радиосетях МС 4G/5G свидетельствуют о существенном усложнении ЭМО, создаваемой ими в местах с высокой плотностью населения:

a) на городских территориях средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого совокупностью квазинепрерывных ЭМП РЧ, в среднем достигает 4–5 В/м, что в соответствии с принятыми критериями уже вызывает обеспокоенность (при таком среднем уровне ЭМФ неизбежно наличие локальных превышений его интенсивностью действующих ПДУ, как в [14]) и представляет опасность для функционирования ТС групп 1–4 классификации [7; 9, табл. 4];

b) наличие различий в ПДУ ЭМП РЧ для населения и ТС групп 1–5, обладающих наибольшей восприимчивостью к этим ЭМП, оказывается малосущественным в силу того, что средние уровни воздействующих ЭМП за пределами СЗЗ и ЗОЗ ниже ПДУ для населения, а ПДУ ЭМП РЧ для ТС определены с запасом, при котором реальные уровни ЭМП, вызывающие отказы ТС, на некоторый защитный интервал выше значения ПДУ, принятого для этих ТС;

c) там, где руководствуются рекомендациями [1], средние уровни ЭМП РЧ в отдельных местах достигают 20–40 В/м, импульсная компонента ЭМФ, создаваемого сетями 5G, может достигать 40–60 В/м [15], что представляет опасность как для населения (с учетом отдаленных последствий), так и для ТС групп 1–7.

2. Опасность ЭМП РЧ для населения и ТС установлена достаточно давно, созданы соответствующие системы защиты (до периода внедрения МС 4G/5G и начала широкого использования в МС режима TDD), достаточно эффективно эту защиту обеспечивающие:

a) система ЭМ защиты населения основана на санитарно-гигиенической паспортизации передающих радиотехнических объектов (ПРТО), включающих один или несколько радиопередатчиков (РЭС), работающих на одну или несколько антенн, расположенных на общей площадке (территории); в рамках данной системы определяются СЗЗ и ЗОЗ ПРТО и обеспечивается отсутствие в них людей;

b) эти системы эффективны в условиях преимущественно однослойного покрытия территории зонами обслуживания БС отдельной радиосети МС и опираются на «нетепловые» гигиенические нормативы ПДУ средних значений напряженности или плотности потока энергии (ППЭ) квазинепрерывных ЭМП РЧ систем беспроводного информационного обслуживания населения различными радиослужбами; они также обеспечивают достаточно эффективную защиту от воздействия ЭМП по порту корпуса большинства ТС (групп 4–6);

c) система защиты населения от импульсных ЭМП РЧ радиолокационных станций (РЛС) обзора пространства также основана на их санитарно-гигиенической паспортизации, но с учетом гигиенического нормирования ПДУ средних уровней импульсных ЭМП РЧ РЛС при краткосрочном облучении ими соответствующей точки пространства главным лепестком диаграммы направленности антенны (ДНА);

d) такие системы менее эффективно обеспечивают ЭМ защиту ТС от воздействия импульсных ЭМП РЧ РЛС по порту корпуса ТС, поскольку на границе СЗЗ и ЗОЗ напряженность этих ЭМП

в импульсе может достигать 100–200 В/м и более. Однако данная опасность в значительной мере компенсируется особенностями размещения РЛС сканирования пространства в особых местах (на удалении от городской застройки, объектов и сооружений, экранирующих маловысотное пространство у земной поверхности), ведомственными и корпоративными ограничениями на размещение ТС и объектов в окрестности РЛС, а также мерами по экранированию помещений объектов инфраструктуры от ЭМП РЛС;

e) система, ограничиваемая ЭМ защитой лишь РЭС, использующих ЭМП РЧ для радиосвязи и передачи данных и имеющих высокую восприимчивость к воздействию ЭМП РЧ по основным и побочным каналам приема, а также к нелинейным эффектам (интермодуляции, блокированию, перекрестным искажениям и т. п.), основана на строгом соблюдении требований Регламента радиосвязи [16] и многочисленных рекомендаций ITU-R, которые на защиту ТС от ЭМ воздействия по порту корпуса не распространяются;

f) системы защиты ТС от воздействия ЭМП РЧ по порту корпуса практически отсутствуют, поскольку, несмотря на существование стандартизованных ограничений на ПДУ этих воздействий в некоторых полосах частот [7; 9, табл. 4], данный параметр не является приоритетным и практически не контролируется при сертификационных испытаниях ТС.

3. Проблемы, ограничивающие применение действующих систем защиты населения и ТС, не являющихся РЭС с функцией радиоприема, от воздействия ЭМП РЧ МС 4G/5G/6G, состоят в следующем:

a) недооценка растущей опасности воздействия импульсных ЭМП РЧ МС 4G/5G/6G по порту корпуса большинства ТС, включая ТС критической инфраструктуры, и отсутствие нормативно-правовой базы определения и соблюдения семейства защитных зон (ЗЗ) и ЗОЗ вокруг БС МС, использующих режим TDD, для ТС различных групп классификации [7, 9];

b) отсутствие научно обоснованных гигиенических нормативов на ПДУ импульсных ЭМП РЧ TDD 5G в диапазонах частот FR1 и FR2 для населения. Результаты анализа расчетных средних ПДУ ЭМП РЧ импульсных РЛС за период обзора [9, табл. 2], соответствующие принятым гигиеническим нормативам и позволяющие косвенно судить о восприимчивости населения к воздействию импульсных ЭМП РЧ МС, свидетельствуют о том, что средние за период обзора расчетные ПДУ ЭМП РЛС составляют 0,11–0,19 мкВт/см^2 (0,64–0,85 В/м) для ПДУ ЭМП РЛС 25 мкВт/см^2 для облучения главным лепестком ДНА РЛС и, соответственно, 0,44–0,75 мкВт/см^2 (1,3–1,7 В/м) – для ПДУ ЭМП 100 мкВт/см^2. Это в 14–90 раз меньше принятого ПДУ квазинепрерывных ЭМП РЧ для населения (что близко к оценкам [12]). Однако, несмотря на сходную в первом приближении биоагрессивность импульсных ЭМП РЧ РЛС и БС TDD МС, «узаконенные» гигиенические нормативы воздействия последних на население и методики паспортизации соответствующих СЗЗ и ЗОЗ отсутствуют;

c) ПДУ воздействия ЭМП РЧ по корпусу оборудования для практически всех видов ТС определены только в отдельных достаточно узких полосах частот [7, 9], являющихся лишь частью диапазона FR1 5G (0,41–7,125 ГГц). В большинстве случаев они не распространяются на полосу частот n78 5G (3,3–3,8 ГГц), планируемую к использованию в сетях 5G TDD, где предлагаются БС с максимальными значениями ЭИИМ [13], а также на полосы частот n46, n77, n79, n102 и n104 5G, расширяющие область частот TDD до верхней границы диапазона FR1. Не установлены требования к ПДУ ЭМП РЧ ТС на полосы частот диапазона FR2 5G, освоение нижней части которого (24–30 ГГц) системами 5G TDD для сценариев с высокой плотностью населения носит приоритетный характер. Таким образом, требования действующих стандартов к восприимчивости ТС по отношению к воздействию ЭМП РЧ по порту корпуса нельзя признать адекватными условиям эксплуатации ТС в ЭМО, создаваемой излучениями систем МС 5G. Их соблюдение не гарантирует безотказного функционирования ТС хотя бы в силу того, что эти требования отсутствуют для большинства полос частот 5G;

d) нормирование ПДУ импульсных ЭМП РЧ МС для населения должно быть обеспечено соответствующими средствами контроля. Последние версии используемых широкополосных средств измерений (СИ) П3-41, П3-42 и других обеспечивают контроль лишь средних уровней ЭМП РЧ при чувствительности 0,26 мкВт/см^2 (1,0 В/м), что недостаточно:

– для контроля средних уровней импульсных ЭМП РЧ МС, соответствующих ожидаемым значениям их ПДУ; необходимая чувствительность ≤(0,1–0,2) В/м в бюджетных вариантах СИ может быть достигнута за счет многоканальности и/или сужения полос частот контроля до полос, выделенных для МС 5G [17];

– для контроля (мониторинга) мгновенных (пиковых) значений напряженности ЭМП РЧ TDD при контроле границ ЗЗ и ЗОЗ по ПДУ ЭМП РЧ для ТС различных групп, что требует соответствующего расширения их функциональности до уровня [18];

e) традиционная система защиты населения от ЭМП РЧ МС не учитывает вклада излучений АТ и периферийных устройств (ПУ) IoT, которые могут вносить существенный вклад в суммарную среднюю интенсивность ЭМФ в местах их пространственной концентрации, что подтверждается оценками [19, 20] и измерениями [21, 22];

f) применимость традиционного подхода к ЭМ защите населения на основе определения, соблюдения и контроля границ СЗЗ и ЗОЗ при многослойной иерархической структуре радиосетей 5G (конфигурация С сценария Dense Urban eMBB 5G в [19, 23]) вызывает сомнения, поскольку в связи с высокой территориальной плотностью БС (сотни БС/км^2) и положением зон обслуживания пико-БС второго слоя на территориях зон обслуживания микро-БС первого слоя, а также с возможным существенным различием в используемых полосах частот (что в будущем может сопровождаться различиями в ПДУ ЭМП РЧ ТС в этих полосах) определить конфигурацию СЗЗ и ЗОЗ крайне сложно;

g) применение традиционного подхода, основанного на определении СЗЗ, к защите населения от воздействия ЭМП РЧ МС внутри зданий, на объектах (супермаркеты, спортивные арены, хотспоты и т. п.), в общественном транспорте, где основной вклад в интенсивность ЭМФ вносят многочисленные внутренние источники помех, но должны учитываться и внешние ЭМП, встречает существенные трудности, связанные как с относительно большим количеством используемых пико- и фемто-БС (точек доступа) и необходимостью учета ЭМП внешних БС, так и с тем, что перспективные полосы частот n257–n263 диапазона СВЧ, предназначенные для применения в ограниченном пространстве, отведены для импульсного режима TDD, научно обоснованные гигиенические нормативы для которого отсутствуют.

4. Восприимчивость ТС к воздействиям ЭМП РЧ по порту корпуса не относится к числу приоритетных параметров ТС, и поэтому, как правило, не контролируется. Информация о фактической восприимчивости ТС к этим воздействиям и о ее соответствии требованиям стандартов отсутствует (это соответствие декларируется производителем ТС), что представляет опасность с учетом наблюдаемой тенденции к усложнению ЭМО, создаваемой излучениями МС, с расширением использования ЭМП РЧ TDD. Требования этих стандартов носят пессимистический характер и определены с запасом по отношению к уровню их реализуемости. Косвенно об этом свидетельствует то, что размеры ЗЗ и ЗОЗ для достаточно многочисленных ТС групп 1–4 превышают размеры СЗЗ и ЗОЗ для населения в странах, где ПДУ ЭМП РЧ находится в диапазоне 6,1–18,4 В/м, однако даже с учетом пик-фактора сигналов МС, достигающего 10–15 дБ, массового нарушения функционирования ТС групп 1–4 из-за воздействия ЭМП РЧ МС в традиционном режиме FDD не наблюдается. Тем не менее, по данным [24], в период с 01.01.2010 по 15.05.2020 в США зарегистрировано 16 304 случая инцидентов с медицинскими устройствами, связанных с ЭМП и ЭМС, что потенциально привело к 17 416 случаям травм и 170 случаям смерти в результате общих неисправностей медицинского оборудования. Поэтому при значительном возрастании мгновенных значений напряженности ЭМП РЧ МС при переходе к режиму TDD достаточность указанного запаса вызывает большие сомнения.

Оценка возможностей реализации комплексной системы электромагнитной защиты элементов биосферы от воздействия радиочастотных электромагнитных полей 5G в Республике Беларусь

В Беларуси создана и функционирует система ЭМ защиты населения от воздействия ЭМП РЧ, основные черты которой, согласно [25], соответствуют советско-российскому типу организации ЭМ защиты населения. Эта система основана на:

– государственном нормировании [11, 26] суммарных средних ПДУ квазинепрерывных ЭМП РЧ для населения 10 мкВт/см^2 (6 В/м) в диапазоне 0,3–300,0 ГГц с учетом опасности отдаленных последствий и «нетепловых» эффектов их воздействия на человеческий организм;

– единой методической основе расчета СЗЗ и ЗОЗ ПРТО [27] и контроля средних суммарных уровней ЭМП РЧ [11, приложение 10] в местах возможного присутствия людей, включая контроль расчетных границ СЗЗ и ЗОЗ;

– обязательной в соответствии с [11] санитарно-гигиенической паспортизации ПРТО, каждый из которых должен иметь санитарный паспорт, оформленный до начала его эксплуатации

и содержащий результаты расчетов распределения интенсивности (расчеты СЗЗ и ЗОЗ) и результаты измерений уровней ЭМП РЧ на прилегающей к ПРТО территории с соответствующими заключениями (согласованиями) органов госсанэпиднадзора, а также заключение этих органов о приемке ПРТО в эксплуатацию.

Важная роль в реализации этой системы принадлежит службе надзора за электросвязью, выполняющей большой объем работ по оформлению санитарных паспортов ПРТО и выдающей соответствующие разрешения на право использования радиочастотного спектра при эксплуатации РЭС гражданского назначения только при наличии заключений соответствующих территориальных центров гигиены и эпидемиологии по результатам экспертизы санитарных паспортов [28]. Внесение в ПРТО изменений (увеличение мощности излучений, изменение азимутов и углов наклона главных лепестков ДНА, а также другие изменения режимов работы входящих в ПРТО БС МС, ухудшающие ЭМО) должно согласовываться с органами санэпиднадзора и оформляться внесением изменений в санитарный паспорт ПРТО [11, п. 95].

Размещение базовых станций систем сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа на социально-значимых объектах (зданиях учреждений дошкольного, общего среднего образования, детских интернатных учреждений, организаций здравоохранения для детей, санаторно-курортных и оздоровительных организаций для детей, а также на территориях земельных участков данных объектов) должно осуществляться после проведения оценки риска возможного неблагоприятного влияния ЭМП на лиц, находящихся в указанных зданиях и на территориях их земельных участков [11, пп. 95, 29].

Принципиальным достоинством этой системы является ее межведомственный характер:

– Министерство здравоохранения Республики Беларусь и органы санэпиднадзора обеспечивают научно обоснованное нормирование ПДУ ЭМП РЧ для населения, утверждение (согласование) санитарных паспортов ПРТО и оформление заключений о приемке ПРТО в эксплуатацию;

– Министерство связи и информатизации Республики Беларусь совместно со службой надзора за электросвязью, обладающей полной информацией о размещении, составе и технических характеристиках всех РЭС ПРТО, оснащенной необходимыми СИ и квалифицированным персоналом для выполнения необходимого объема измерений уровней ЭМП РЧ на прилегающей к ПРТО территории, обеспечивают как оформление санитарных паспортов ПРТО с соответствующими заключениями органов санэпиднадзора, так и выдачу разрешений на право использования радиочастотного спектра при эксплуатации РЭС гражданского назначения (только при наличии вышеупомянутых заключений органов санэпиднадзора).

Данные особенности системы не только обеспечивают ее эффективность и надежность, но и допускают естественным образом расширение области ее применения на обеспечение ЭМ безопасности ТС и объектов критической инфраструктуры, расположенных в окрестности ПРТО. Для этого достаточно перейти к оформлению более общего «Паспорта ЭМ безопасности ПРТО», согласуемого органами санэпиднадзора и органами надзора за электросвязью и содержащего следующие разделы (излагаются в порядке обсуждения):

a) «Состав и характеристики ПРТО», содержит основные данные о характеристиках РЭС ПРТО, определяющих виды и распределение интенсивности излучаемых ими ЭМП РЧ в окружающем пространстве, и ситуационный план окрестности ПРТО, на котором нанесены все здания с указанием их этажности и назначения (жилое, общежитие, социально значимый объект с указанием типа, объект критической инфраструктуры с указанием типа и т. п.), а также точек размещения антенн ПРТО;

b) «Электромагнитная безопасность населения», содержит:

– при отсутствии в составе ПРТО источников импульсных ЭМП РЧ – результаты расчета СЗЗ и ЗОЗ ПРТО по методике [27] для принятого ПДУ квазинепрерывных ЭМП РЧ для населения 10 мкВт/см^2 (6 В/м) [11, приложение 5] с определением относительной суммарной средней интенсивности ЭМП в соответствии с [11, п. 9 приложения 1];

– при наличии в составе ПРТО, наряду с источниками квазинепрерывных ЭМП РЧ импульсных ЭМП РЧ, – результаты расчета СЗЗ и ЗОЗ ПРТО по методике [27] для принятого ПДУ квазинепрерывных ЭМП РЧ для населения 10 мкВт/см^2 (6 В/м), ПДУ импульсных сигналов РЛС 100 мкВт/см^2 [11, приложение 5] и требующего отдельного нормирования ПДУ для населения средних уровней импульсных ЭМП РЧ МС в режиме TDD;

c) «Электромагнитная безопасность технических средств и систем», содержит результаты расчета ЗЗ и ЗОЗ ПРТО для ТС критической инфраструктуры в соответствии с [11, пп. 4, 9 при-

ложения 1] для ПДУ ЭМП РЧ, принятых для различных групп ТС, используемых на объектах критической инфраструктуры, в соответствии с классификацией [7, 9];

d) «Испытания на электромагнитную безопасность», содержит:

– результаты контроля уровней ЭМП РЧ в различных точках окрестности ПРТО, подтверждающие непревышение установленных ПДУ для населения суммарными средними уровнями ЭМП РЧ ПРТО за пределами расчетных СЗЗ и ЗОЗ, а также непревышение установленных ПДУ для ТС различных групп мгновенными значениями уровней ЭМП РЧ за пределами расчетных ЗЗ и ЗОЗ для ТС объектов критической инфраструктуры;

– для ПРТО, в составе которых присутствуют РЭС-источники импульсных ЭМП РЧ, – результаты анализа возможного нарушения работы ТС различных групп в окрестности ПРТО при его опытной эксплуатации в период проведения измерений (контроля) уровней ЭМП РЧ в различных точках окружающего ПРТО пространства.

На рис. 1 приведены зависимости размеров ЗОЗ D_P для ТС от ПДУ ЭМП РЧ E_{MPL} при различных значениях ЭИИМ БС TDD P_e, на рис. 2 – расчетные ЗОЗ для ПДУ ЭМП ТС групп 2–5 [7, 9] и антенны Nokia AirScale MAA 64T64R 192 AE B42 200 W AEQA [13] 5G TDD с ЭИИМ ≥77,5 дБм (в «однолучевом» режиме). Анализ рисунков свидетельствует о том, что при типовых значениях импульсной ЭИИМ БС 10–100 кВт размеры ЗОЗ для наиболее многочисленных групп 4–5 ТС достигают 0,2–0,7 км, т. е. они заметно перекрывают зоны обслуживания БС МС на городских территориях. Это доказывает потенциальную опасность ЭМП таких БС для ТС групп 1–5 на всей территории с высокой плотностью населения, обслуживаемой системами МС с TDD.

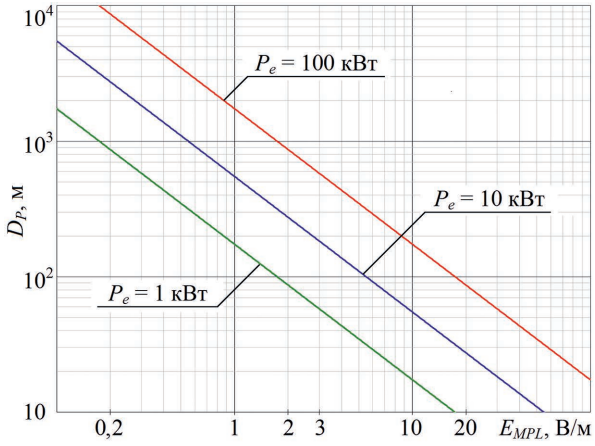


Рис. 1. Зависимости размеров D_P от предельно допустимого уровня электромагнитного поля E_{MPL} при различных P_e базовой станции TDD

Fig. 1. Dependence of D_P dimensions on the maximum permissible electromagnetic field level E_{MPL} for various base station P_e values in a TDD system

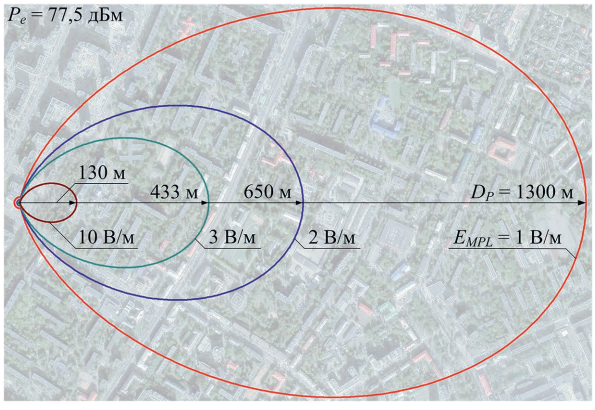


Рис. 2. Расчетные D_P для предельно допустимого уровня радиочастотного электромагнитного поля групп 2–5 технических средств и типовой секторной антенны базовой станции TDD 5G

Fig. 2. Estimated D_P for the maximum permissible level of radio frequency electromagnetic field of groups 2–5 of technical equipment and a typical sector antenna of a TDD 5G base station

Для технической реализации подобной межведомственной системы ЭМ паспортизации ПРТО необходимо принять временный гигиенический норматив ПДУ для населения средних уровней импульсных ЭМП РЧ МС в режиме TDD. Принимая во внимание аргументацию [7, 9, 12], этот норматив может быть установлен на уровне 0,25 мкВт/см^2 (1,00 В/м). Очевидно, что минимизация издержек от внедрения подобной системы паспортизации ПРТО требует полноценного научного обоснования критериев восприимчивости населения и ТС различных видов к воздействию импульсных ЭМП РЧ TDD, в частности:

– объективных исследований воздействия импульсных ЭМП РЧ TDD диапазонов FR1, FR2 на животных с последующей их экстраполяцией на человеческий организм по известным методикам и принятия научно обоснованного значения ПДУ этих ЭМП для населения;

– масштабных научных исследований воздействия этих ЭМП на ТС различных групп во всех полосах частот диапазонов FR1, FR2, отведенных для режима TDD, с обоснованием ПДУ мгно-

венных значений напряженности поля ЭМП РЧ МС, которые, возможно, окажутся более высокими (менее жесткими) по сравнению с принятыми в стандартах [9, табл. 4];

– введения обязательной сертификации ТС, предназначенных к использованию на объектах критической инфраструктуры, по параметрам их восприимчивости к воздействию ЭМП РЧ в диапазонах частот МС.

В предложенном виде система паспортизации способна решить первоочередные задачи защиты населения и объектов критической инфраструктуры от воздействия импульсных ЭМП РЧ активно внедряемых БС МС в режиме TDD. Однако рассмотренные дополнения в эту систему в перспективе, связанной с полномасштабным внедрением беспроводных систем и услуг 5G/6G, не обеспечат ее полной адекватности по отношению к ЭМО, создаваемой излучениями оборудования 5G в местах с высокой плотностью населения, в силу ряда обстоятельств, изложенных выше (раздел «Анализ проблем», пп. 3e, f, g):

a) при многослойном покрытии территории зонами обслуживания БС различных уровней при их высокой территориальной плотности (до сотен БС на 1 км^2 [19, 23]) выделить отдельные ПРТО и границы их окрестностей проблематично. В этих условиях представляется целесообразным перейти к оформлению паспортов ЭМ безопасности выделенных фрагментов городской застройки (кварталов, микрорайонов и т. п.) либо локальных территориально рассредоточенных комплексных объектов с расчетом «рельефа» интенсивности ЭМП РЧ и определением возможных СЗЗ, а также с мониторингом ЭМП РЧ на их территории;

b) излучения АТ и ПУ МС могут вносить значительный вклад в ЭМФ, создаваемый системами МС, сопоставимый со вкладом излучений БС (а в местах концентрации АТ и ПУ – определяющий вклад [19–22]), что требует внесения изменений в методическую базу расчетов интенсивности суммарных средних уровней ЭМП РЧ для населения. Попытка учета излучений АТ МС при анализе ЭМ безопасности социально значимых объектов сделана в методических указаниях [29]; их доработка и упрощение возможны с использованием методики и оценок вклада излучений АТ и ПУ МС в среднюю интенсивность ЭМФ, приведенных в [19, 20];

c) система не распространяется на ЭМ защиту людей и ТС в помещениях, где требуется учитывать и ЭМП РЧ фемто-БС, АТ и ПУ МС, распределенных по внутреннему пространству зданий, и ЭМП внешних БС. Для паспортизации ЭМ безопасности зданий необходимо разработать методики оценки средних уровней ЭМФ внутри помещений (это возможно на основе [30–32]), а также обеспечить контроль уровней ЭМФ в различных точках внутреннего пространства здания, подтверждающих безопасность присутствия людей и эксплуатации ТС в здании (что возможно с использованием СИ действующей системы мониторинга ЭМО).

Заключение

1. Актуальность создания комплексной системы электромагнитной защиты важнейших элементов биосферы (населения и технических средств объектов критической инфраструктуры) от воздействия радиочастотных электромагнитных полей 5G обусловлена расширяющимся использованием в системах 5G импульсного режима временного дуплекса TDD, поскольку в этом режиме мгновенные значения эквивалентной изотропной излучаемой мощности базовых станций на один-два порядка превышают таковую в традиционном квазинепрерывном режиме частотного дуплекса FDD, а биоагрессивность импульсных радиочастотных электромагнитных полей существенно выше биоагрессивности квазинепрерывных электромагнитных полей FDD.

2. Авторы выражают надежду, что приведенная в данной статье аргументация в сочетании с обзорной информацией [9] и оценками [7, 8] будет способствовать осознанию актуальности и необходимости оперативного решения проблемы безопасности радиочастотных электромагнитных полей TDD 5G для населения и многочисленных технических средств различного назначения, ее объективному анализу заинтересованными, организации необходимых исследований и разработок, а также принятию необходимых и эффективных решений, направленных на обеспечение безопасности населения и надежного беспомехового функционирования технических средств объектов критической инфраструктуры всех областей народного хозяйства и государственного управления в условиях постоянно усложняющейся электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями оборудования систем мобильной связи 4G/5G/6G.

Список литературы / References

1. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz) (2020) *Health Physics*. 118 (5), 483–524.
2. Hinrikus H. (2026) *Nonthermal Mechanism of Low-Level Microwave Effect on the Human Brain*. USA, CRC Press Publ.
3. 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.
4. Buchner K., Rivasi M. (2020) *The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Conflicts of Interest, Corporate Capture and the Push for 5G*. https://www.michele-rivasi.eu/wp-content/uploads/2020/06/ICNIRP-rapport-FR-FINAL-JUIN-2020.pdf.
5. Grigoriev Yu. G., Grigoriev O. A. (2016) *Cellular Communications and Health: Electromagnetic Environment, Radiobiological and Hygienic Problems, Hazard Forecast*. Moscow, Economics Publ. (in Russian).
6. 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.
7. 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 (in Russian).
8. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91 (in Russian).
9. 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).
10. GOST R 51317.2.5–2000 (IEC TS 61000-2-5:1995). *Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electromagnetic Environment. Classification of Electromagnetic Disturbances for Different Locations of Technical Equipment* (in Russian).
11. 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).
12. 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. *CONCEPCII*. 1 (41), 3–17 (in Russian).
13. *Nokia-airscale-5G-radio-description-datasheet-5g.pdf*. Available: https://1com.net/wp-content/uploads/2021/05/Nokia-airscale-5G-radio-description-datasheet-5g.pdf.
14. 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).
15. Loizeau N., Haas D., Zahner M., Fröhlich J., Stephan C., Gugler M., et al. (2026) Spatiotemporal Trends of Ambient Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF-EMF) During the 5G Rollout in Switzerland. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*.
16. Radio Regulations. *ITU, 2024*. Available: https://www.itu.int/pub/R-REG-RR.
17. Deprez K., Colussi L., Korkmaz E., Aerts S., Land D., Littel S., et al. (2023) Comparison of Low-Cost 5G Electromagnetic Field Sensors. *Sensors.* 23 (6).
18. *Narda Safety Test Solutions*. Available: https://www.narda-sts.com/en/applications/emf-safety/.
19. 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).
20. Mordachev V. (2024) Radiofrequency Electromagnetic Pollution of the Habitat Created by Mobile Communications. *Biology Bulletin*. 51 (11), 3481–3495.
21. Chiaraviglio L., Lodovisi C., Bartoletti S., Elzanaty A., Slim-Alouini M. (2024) Dominance of Smartphone Exposure in 5G Mobile Networks. *IEEE Tr. on Mob. Comp.* 23 (3), 2284–2302.
22. 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.* https://doi.org/10.1007 /s12243-026-01143-2.
23. Report ITU-R M.2412 (10/2017). *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*.
24. Silberberg L. (2020) An FDA Perspective on Medical Device EMC and Wireless. *U.S. Food and Drug Administration (FDA) Center for Devices and Radiological Health (CDRH)*.
25. Grigoriev O. A., Goshin M. E., Prokofyeva A. V., Alekseeva V. A. (2019) Features of National Policy in Approaches to Electromagnetic Field Safety of Radio Frequencies Radiation in Different Countries. *Hygiene & Sanitation*. 98 (11), 1184–1190 (in Russian).

26. Sanitary Norms, Rules and Hygienic Standards. Hygienic Requirements for the Installation and Operation of Cellular Communication Systems. *Approved by the Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus dated 01.02.2010 No 14* (in Russian).
27. Instructions for Use "Methods for Determining Levels of Electromagnetic Radiation Generated by Transmitting Radio-Technical Equipment Operating in the Radio Frequency Range". *Approved by the Deputy Minister of Health – Chief State Sanitary Doctor of the Republic of Belarus on April 29, 2013, Registration No 006-0413.*
28. Sanitary Passport of the Transmitting Radio Facility. *State Supervisory Department for Telecommunications of the Republic of Belarus*. https://sod.belgie.by/ru/services/sanpasport (in Russian).
29. Application Instructions. Estimation of Risk for Population Health from Electromagnetic Fields Created by Base Stations of Cellular Mobile Communications and Broadband Wireless Access. *Belarus Ministry of Health, No 093-0610, 2010* (in Russian).
30. Mordachev V. I. (2021) Characteristics of the Electromagnetic Environment Created by Radiations of User Equipment of ...4G/5G/6G Cellular (Mobile) Communications in Buildings. *Doklady BGUIR*. 19 (6), 42–50 (in Russian).
31. Mordachev V. I. (2023) Influence of the Heterogeneity of Spatial Distribution of Peripheral Radio Equipment of 4G/5G Networks on the Level of Electromagnetic Background Created in Buildings. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 49–57 (in Russian).
32. Mordachev V. I. (2025) Radio Frequency Electromagnetic Background in 5G Hot Spots. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 35–45. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-35-45 (in Russian).

Поступила 01.06.2026 Принята в печать 30.06.2026

Received: 1 June 2026 Accepted: 30 June 2026

Вклад авторов

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

Свистунов А. С. выполнил расчеты зон ограничения застройки для технических средств различных групп, участвовал в обсуждении аргументации, результатов и выводов исследований.

Authors' contribution

Mordachev V. substantiated and systematized the problems and opportunities 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 development restriction zones for the equipment of different groups, participated in the discussion of arguments, research results and conclusions.

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