

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ НАИХУДШЕГО СЛУЧАЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ СОТОВОЙ СВЯЗИ

В.И. МОРДАЧЁВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 8 октября 2017

Аннотация. Приведены результаты сравнения оценок средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовыми станциями сотовой связи, с использованием предложенной автором методики, с опубликованными результатами измерений уровней электромагнитного фона в различных странах. Эти данные подтверждают адекватность предложенной методики и ее практическую значимость для оценки электромагнитной экологии территорий и электромагнитной безопасности населения.

Ключевые слова: сотовая связь, электромагнитная нагрузка, электромагнитный фон, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

Abstract. Results of comparison estimations of average intensity of the electromagnetic background created by base stations of cellular communications, performed with use of the technique offered by the author, with the published results of measurements of levels of an electromagnetic background in the various countries, are presented. This data confirms of adequacy of the offered technique and its practical importance for an estimation of electromagnetic ecology of different areas and electromagnetic safety of the population.

Keywords: cellular communications, electromagnetic loading, electromagnetic background, electromagnetic ecology, electromagnetic safety.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 12-18

**Verification of the worst case model for the estimation of average intensity
of the electromagnetic background created by base stations of cellular communications**

V.I. Mordachev

Введение

В [1, 2] предложена следующая простая формула для пессимистической оценки (оценки наихудшего случая) средней суммарной интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого в точке наблюдения (ТН) у земной поверхности всем множеством N базовых станций (БС) сотовой связи (СС), расположенных случайно по отношению к ТН в ее окрестности, включающей как зону свободного распространения радиоволн (РРВ) между БС и ТН, так и область интерференционного РРВ между ними:

$$Z_{\Sigma BS} \approx \frac{L_{TBS}}{2} \ln \left(\frac{6,6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad L_{TBS} = \rho_{BS} P_{eBS}, \quad Z_{\Sigma BS} = \sum_{i=1}^N |\Pi_{BSi}|; \quad E_{\Sigma BS} = \sqrt{120\pi Z_{\Sigma BS}}, \quad (1)$$

где $Z_{\Sigma BS}$ – суммарная интенсивность ЭМФ [Вт/м²], создаваемого БС в ТН, определяемая как скалярная сумма значений плотности потока мощности (ППМ) Π_{BSi} электромагнитных полей (ЭМП) всех N БС в ТН; H_{OP} – высота ТН над поверхностью; λ – длина волны излучения БС; L_{TBS} – электромагнитная нагрузка (ЭМН) на территорию, [Вт/м²], создаваемая БС в окрестности ТН; ρ_{BS} – средняя территориальная плотность БС, [БС/м²], в окрестности ТН; P_{eBS} – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) электромагнитного излучения (ЭМИ)

БС; $E_{\Sigma BS}$ – суммарная интенсивность ЭМФ в единицах напряженности ЭМП [В/м] (среднеквадратическое значение).

Соотношение (1) получено с использованием следующих допущений (упрощений использованных моделей):

а) высота точки наблюдения над поверхностью существенно меньше минимально возможного расстояния между точкой наблюдения и антенной ближайшей БС;

б) ЭМИ БС является изотропным с ЭИИМ, равной ЭИИМ БС в главном лепестке диаграммы направленности (ДН) ее антенны;

в) минимально возможное расстояние от фазового центра антенны БС до ТН превышает радиус ближней зоны ЭМИ БС, условия РРВ от ближайших БС в ТН соответствуют РРВ в свободном пространстве; модель РРВ между ТН и БС соответствует нижней границе затухания РРВ в городской застройке в [3, формулы (1), (2)]:

$$\Pi_{BS} = \begin{cases} P_{eBS} / (4\pi R^2), & R \leq R_{BP}; \\ R_{BP}^2 P_{eBS} / (4\pi R^4), & R > R_{BP}; \end{cases} \quad R_{BP} = 4H_{BS}H_{OP} / \lambda, \quad (2)$$

где H_{BS} – высота антенн БС над поверхностью; R – расстояние между ТН и БС – источником ЭМП; R_{BP} – радиус окрестности ТН, в которой для расположенных в ней БС условия РРВ в ТН могут быть приняты соответствующими РРВ в свободном пространстве («breakpoint distance»);

г) при определении L_{TBS} в (1) значения P_{eBS} принимаются соответствующими регистрационным значениям ЭИИМ БС. Поскольку фактическая суммарная ЭИИМ БС приближается к регистрационным значениям только в часы максимальной нагрузки сети (когда в БС используются все радиоканалы GSM и загрузка каналов UMTS близка к максимально допустимой), оценочные уровни (1) суммарной интенсивности ЭМФ следует, по возможности, сравнивать с измеренными средними значениями интенсивности ЭМФ в периоды максимальной нагрузки сети либо с максимальными измеренными значениями.

Перечисленные допущения определяют в целом пессимистический характер оценок суммарной интенсивности ЭМФ в ТН с использованием (1), поскольку в силу указанных допущений соотношение (1) соответствует пиковой нагрузке сети СС и фактически не учитывает затенения БС других сайтов элементами городской застройки, а также уменьшения ЭИИМ БС в направлении на ТН при приближении последней к основанию антенной мачты БС вследствие направленности ЭМИ БС в вертикальной плоскости. С другой стороны, к факторам, снижающим пессимизм оценок (1), следует отнести фундаментальное свойство электромагнитной обстановки (ЭМО) в территориально распределенных радиосистемах, заключающееся в наличии в ТН преобладающего ЭМП, создаваемого ближайшим источником ЭМИ (условия РРВ которого в ТН, как правило, соответствуют (2) при $R < R_{BP}$) [4], а также тот факт, что модель (1) не учитывает увеличения интенсивности ЭМФ в ТН за счет суммирования прямого и отраженных от поверхностей (земли, стен зданий) лучей.

Принимая во внимание наличие публикаций с результатами измерений интенсивности ЭМФ от систем сотовой связи в различных городах и странах, оценку адекватности (верификацию) предлагаемой методики прогноза интенсивности ЭМФ по формуле (1) можно выполнить, используя опубликованные результаты измерений, и опираясь на оценки ЭМН на территорию, создаваемой БС СС в местах проведения этих измерений. Ниже приводятся результаты верификации модели (1) на основе использования результатов измерений, приведенных в [9–11].

Типовые исходные данные для оценки ЭМН на территорию

Приведенных в [5–7] данных об условиях формирования ЭМФ, как правило, недостаточно для оценки ЭМН на территорию, созданную совокупностью БС в окрестности ТН, и выполнения оценок с использованием (1). Поэтому здесь и далее используем следующие типовые характеристики СС, основанные на экспертной оценке сложившейся практики и результатах исследования вариантов высококачественного планирования сотовых радиосетей в городских условиях, обеспечивающих компромиссный уровень внутрисетевых помех при высоком качестве предоставления услуг [8, 9], а также на известные данные [10–12]

о территориальной плотности абонентов СС и об удельной интенсивности трафика G [Эрл.] в сотовых сетях:

– будем полагать, что в городской застройке европейского типа используются преимущественно трехсекторные БС с уровнями ЭИИМ 50–53 dBm в частотных каналах GSM-900, 47–50 dBm – в каналах GSM-1800 и 53–57 dBm – в каналах UMTS;

– в сетях сотовой связи удельная интенсивность речевого трафика в часы наибольшей нагрузки за последние 20 лет возросла с 0,02–0,04 Эрл. [11] до 0,08–0,1 Эрл [12] и для конкретного периода измерений может быть оценена с использованием линейной интерполяции;

– территориальная плотность абонентов СС, имеющая определяющее влияние на ЭМН, создаваемую совокупностью БС на данной территории, изменяется в широких пределах: 3000–100000 ед./км² – для условий города (urban area), 300–3000 ед./км² – для условий пригорода (suburban area) и 10–300 ед./км² – в сельской местности (rural area) [10, 12], что требует уточнения в каждом конкретном случае с использованием справочных данных о плотности населения и его охвате услугами сотовой связи в период проведения измерений.

Верификация (1) по экспериментальным данным [5]

В [5] содержатся следующие результаты измерений и исходные данные:

а) среднеквадратические значения напряженности совокупного ЭМФ, создаваемого системами сотовой связи GSM-900, GSM-1800 и UMTS-2100 в фиксированной точке города (Demirtepe-Ankara, Турция), полученные в результате автоматизированных измерений в течение 4 месяцев в период 01.06.2011–01.10.2011: среднее значение 1,53 В/м, минимальное 1,18 В/м, максимальное 2,36 В/м; при этом значения максимальных измеренных уровней ЭМФ при наблюдении в течение дня составили 1,97–2,09 В/м (п. 4.1 в [5]), при наблюдении в течение отдельных недель и месяцев составили 2,13–2,28 В/м (пп. 4.2, 4.3 в [5]);

б) точка наблюдения (расположения приемной антенны) располагалась на высоте 2 м над поверхностью на крыше здания. Поскольку эта высота существенно меньше минимально возможного расстояния между данной точкой и антенной ближайшей БС, условия ее размещения адекватны условиям размещения точки наблюдения по отношению к антеннам БС, принятым при выводе модели (1);

в) территория Demirtepe-Ankara (Турция) характеризуется высокой плотностью БС и высоким уровнем речевого трафика. В окрестности радиуса 3,5–4 км (40–50 км²) вокруг точки наблюдения в период проведения измерений располагались 1586 односекторных БС (около 530 трехсекторных БС) с примерно 6000 трансиверами, т. е. примерно 4 трансивера (или 4 радиоканала) на сектор БС. Средняя территориальная плотность трехсекторных БС в рассматриваемой области составила 10–12 БС/км².

Принимая во внимание принятые выше типовые исходные данные, будем полагать, что в каждом секторе БС имеется один частотный канал GSM-900 с ЭИИМ 50–53 dBm, два частотных канала GSM-1800 с ЭИИМ 47–50 dBm и один частотный канал UMTS с ЭИИМ 53–57 dBm (суммарная ЭИИМ БС составит 0,4–0,9 кВт при практически круговой ДН ЭМИ трехсекторной БС). Это предположение основано на данных (рис. 4, табл. 4 в [5]), свидетельствующих о преобладании ЭМП от БС UMTS и позволяющих оценить соотношение уровней ЭМИ БС GSM-900, GSM-1800 и UMTS.

В окрестности точки измерений плотность БС в 2–3 раза выше, чем в среднем на рассматриваемой территории, что следует из карты распределения БС в окрестности точки наблюдения (рис. 3 в [5]). Будем полагать, что увеличение территориальной плотности БС в окрестности точки измерения, приводящее к уменьшению размеров сайтов и предельной дальности связи, сопровождается соответствующим уменьшением ЭИИМ в радиоканалах БС для снижения уровней внутрисетевых помех при сохранении на прежнем уровне средней ЭМН на территорию, создаваемой БС.

С учетом вилочного характера исходных данных, выполним оценки ЭМН на территорию и оценки интенсивности (1) ЭМФ, создаваемых отдельно БС GSM-900 с ЭИИМ 50–53 dBm $\{L_{TBS900}, Z_{\Sigma BS900}\}$, БС GSM-1800 с ЭИИМ 47–50 dBm $(L_{TBS1800}, Z_{\Sigma BS1800})$ и БС UMTS

с ЭИИМ 53–57 dBm ($L_{TBS2100}$, $Z_{\Sigma BS2100}$), а также среднюю интенсивность совокупного ЭМФ в единицах ППМ $Z_{\Sigma BS}$ и в единицах напряженности ЭМП $E_{\Sigma BS}$:

$$\begin{aligned} L_{TBS900} &= 1,0-2,4 \text{ kW/km}^2 = 0,001-0,0024 \text{ W/m}^2, & Z_{\Sigma BS900} &= 0,0019-0,0044 \text{ W/m}^2; \\ L_{TBS1800} &= 1,0-2,4 \text{ kW/km}^2 = 0,001-0,0024 \text{ W/m}^2, & Z_{\Sigma BS1800} &= 0,0022-0,0053 \text{ W/m}^2; \\ L_{TBS2100} &= 2,0-6,0 \text{ kW/km}^2 = 0,002-0,006 \text{ W/m}^2, & Z_{\Sigma BS2100} &= 0,0045-0,014 \text{ W/m}^2; \\ Z_{\Sigma BS} &= Z_{\Sigma BS900} + Z_{\Sigma BS1800} + Z_{\Sigma BS2100} = 0,0086-0,024 \text{ W/m}^2, & E_{\Sigma BS} &= 1,80-3,01 \text{ V/m}. \end{aligned}$$

Нижняя граница интервала значений $E_{\Sigma BS}$, полученного с использованием (1), на 18 % (1,4 дБ) выше приведенного в [5] среднего значения интенсивности ЭМФ 1,53 В/м; данный интервал охватывает значения максимальных измеренных уровней ЭМФ 1,97–2,09 В/м при наблюдении в течение дня, 2,13–2,28 В/м при наблюдениях в течение отдельных недель и месяцев и 2,36 В/м за период наблюдений в течение 4 месяцев.

Верификация (1) по экспериментальным данным [6]

В [6] приведены результаты измерений на открытой местности в Швейцарии интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС (GSM900, GSM-1800, UMTS) и вещания (FM Radiom DAB, TV), при преобладании ЭМП GSM-1800, в условиях городской застройки Базеля, и интенсивности ЭМФ, создаваемого системами GSM 900 в Бубендорфе (сельская местность). Измерения проводились в 2005 году на высоте 1,5 м над земной поверхностью; в Базеле средний уровень ЭМФ составил 0,50 В/м, максимальный уровень ЭМФ составил 1,50 В/м; в Бубендорфе средний и максимальный уровень составили соответственно 0,15 В/м и 0,50 В/м.

Приведенных в [6] данных недостаточно для оценки средней ЭМН на территорию, создаваемую совокупностью БС в Базеле и Бубендорфе, и выполнения оценок с использованием (1). Поэтому, как и в предыдущем случае, сделаем ряд предположений, связанных с прогнозом ЭМН на территорию этих населенных пунктов:

а) в той части Базеля, где проводились исследования, – плотная среднеэтажная застройка (3–4 этажа); в Бубендорфе – малоэтажная застройка; можно предположить, что ЭМН на исследуемых городской и загородной территориях отличается примерно на порядок, что в целом соответствует информации, содержащейся в [6];

б) удельная интенсивность речевого трафика в час наибольшей нагрузки сетей СС в 2005 году может быть принята на уровне $G \approx (0,05-0,07)$ Эрл.;

в) плотность населения в Базеле в 2005 году, по данным [13, 14], равна примерно 5000–7000 чел./км², в Бубендорфе (с учетом соображений п.а) плотность населения может быть принята на уровне 500–700 чел./км². С учетом предполагаемого охвата населения Швейцарии в 2005 году услугами СС на уровне 75–85 %, примем среднюю территориальную плотность абонентских станций (АС) СС в период проведения измерений примерно равной $\rho_{MS} \approx 5000/\text{км}^2$ в Базеле и $\rho_{MS} \approx 500/\text{км}^2$ в Бубендорфе;

Здесь и далее используем следующую методику оценки ЭМН на территорию, на которой проведены измерения интенсивности ЭМФ:

а) используя данные об удельной интенсивности речевого трафика, оценим территориальную плотность АС в режиме излучения $\rho_{AMS} = G \cdot \rho_{MS}$: для Базеля получим $\rho_{AMS} \approx (250-350) / \text{км}^2$, для Бубендорфа $\rho_{AMS} \approx (25-35) / \text{км}^2$;

б) далее оценим минимальное среднее число частотных каналов GSM, требуемое для обеспечения радиосвязи с АС на площади 1 км²: $N_C \approx \rho_{AMS}/8$; для сети GSM-1800 Базеля получим $N_C \approx (32-44) / \text{км}^2$; для фрагмента сети GSM-900 Бубендорфа получим $N_C \approx (3-5) / \text{км}^2$;

в) используя известную методику [11], оценим ориентировочное число частотных каналов GSM, требуемое для обеспечения обслуживания N_A абонентов с высоким качеством («grade-of-service» $B = 0,98-0,99$) в час наибольшей нагрузки $N_{QoS} \approx K_{QoS} N_C$, $K_{QoS} > 1$: для Базеля получим $N_{QoS} \approx (36-53) / \text{км}^2$; для Бубендорфа получим $N_{QoS} \approx (4-7) / \text{км}^2$.

Примечание: значения N_C , N_{QoS} определены ориентировочно без учета наличия каналов синхронизации, дробления общей зоны обслуживания сети на отдельные сектора БС и т. п.;

г) используя данные о канальной ЭИИМ P_C БС GSM на рассматриваемой территории, выполним оценку средней ЭМН на данную территорию $L_{TBS} = P_C \cdot N_{QoS}$. Для Базеля средняя

ЭМН на территорию, создаваемая БС GSM-1800 при канальной ЭИИМ $P_C = 50-100$ W, составит $L_{TBS} \approx 1,8-5,3$ kW/km² (0,0018–0,0053 W/m²). Для Бубендорфа средняя ЭМН на территорию, создаваемая БС GSM-900 при канальной ЭИИМ $P_C = 50-53$ dBm (100–200 W), составит $L_{TBS} \approx 0,4-1,4$ kW/km² (0,0004–0,0014 W/m²);

д) для полученных значений L_{TBS} получим следующие оценки интенсивности ЭМФ на высоте $H_{OP} = 1,5$ м: для территории Базеля $Z_{\Sigma BS} = 0,0037-0,011$ W/m², $E_{\Sigma BS} \approx 1,18-2,04$ V/m; для территории Бубендорфа $Z_{\Sigma BS} \approx 0,0007-0,0024$ W/m², $E_{\Sigma BS} \approx 0,51-0,87$ V/m.

Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными результатами измерений: максимальная измеренная интенсивность ЭМФ в Базеле (1,5 В/м) попадает в интервал 1,18–2,04 V/m пессимистической оценки с использованием (1); максимальная измеренная интенсивность ЭМФ в Бубендорфе (0,5 В/м) соответствует нижней границе полученного расчетного интервала 0,51–0,87 V/m.

Верификация (1) по экспериментальным данным [7]

В [7] содержится обзор результатов измерений суммарной интенсивности ЭМП, выполненных в 2006–2012 гг. в 19 европейских странах; в обзоре приведены следующие обобщенные данные сравнительного анализа результатов измерений в странах Евросоюза: средние уровни напряженности поля измерений получены в пределах от 0,08 до 1,8 В/м, менее 1 % значений превышали 6 В/м и менее 0,1 % значений превышали 20 В/м. Авторами [7] отмечается различие условий и слабая сопоставимость результатов измерений, поэтому для верификации модели (1) произведен отбор данных [7], характеризующих ЭМФ БС сотовой связи, и выполнены оценки (1) для ожидаемых уровней ЭМФ в следующих типовых условиях:

– в условиях города при функционировании сети GSM-1800 с канальной ЭИИМ БС 47–50 dBm для различной территориальной плотности абонентов (экстремальной $\rho_{MS} = 10^4-10^5$ /км² и условно средней $\rho_{MS} = 10^3-10^4$ /км², принимая во внимание данные [10, 12] и др., в том числе данные предыдущего раздела), высоты точки наблюдения $H_{OP} = 1,5$ м и удельной интенсивности трафика $G = 0,08$ Эрл. (табл. 1);

– в условиях пригорода при функционировании GSM-900 с канальной ЭИИМ БС 50–57 dBm для различной территориальной плотности абонентов сотовой связи ($\rho_{MS} = 10^2-10^3$ /км²), $H_{OP} = 1,5$ м и $G = 0,08$ Эрл. (табл. 2);

– в условиях сельской местности при функционировании сети GSM-900 с канальной ЭИИМ БС 57–60 dBm для различной территориальной плотности абонентов сотовой связи ($\rho_{MS} = 20-80$ /км²), $H_{OP} = 1,5$ м и $G = 0,08$ Эрл. (табл. 2).

Таблица 1. Расчетная интенсивность ЭМФ (условия города, GSM-1800, канальная ЭИИМ 0,05–0,1 кВт)

ρ_{MS} [АС/км ²]	100000	25000	10000	5000	2500	1000
ρ_{AMS} [АС/км ²]	8000	2000	800	400	200	80
N_C [ед./км ²]	1000	250	100	50	25	10
N_{Obs} [ед./км ²]	1100	280	120	60	32	14
L_{TBS} [кВт/км ²]	55–110	14–28	6–12	3–6	1,6–3,2	0,7–1,4
(L_{TBS} [Вт/м ²])	(0,055–0,11)	(0,014–0,028)	(0,006–0,012)	(0,003–0,006)	(0,0016–0,0032)	(0,0007–0,0014)
$Z_{\Sigma BS}$ [Вт/м ²]	0,11–0,23	0,029–0,057	0,012–0,25	0,006–0,012	0,0033–0,0066	0,0014–0,0029
$E_{\Sigma BS}$ [В/м]	6,4–9,2	3,3–4,6	2,1–3,1	1,5–2,1	1,1–1,6	0,7–1,0

Таблица 2. Расчетная интенсивность ЭМФ (GSM-900)

	Пригород, канальная ЭИИМ 0,1–0,5 кВт			Сельская местность, канальная ЭИИМ 0,5–1,0 кВт		
ρ_{MS} [АС/км ²]	500	250	100	80	40	20
ρ_{AMS} [АС/км ²]	40	20	8	6,4	3,2	1,6
N_C [ед./км ²]	5	3	1	0,8	0,4	0,2
N_{Obs} [ед./км ²]	8	5	2	1,2	0,7	0,4
L_{TBS} [кВт/км ²]	0,8–4,0	0,5–2,5	0,2–1,0	0,6–1,2	0,35–0,7	0,2–0,4
(L_{TBS} [Вт/м ²])	(0,0008–0,004)	(0,0005–0,0025)	(0,0002–0,001)	(0,0006–0,0012)	(0,00035–0,0007)	(0,0002–0,0004)
$Z_{\Sigma BS}$ [Вт/м ²]	0,0014–0,007	0,00085–0,043	0,00034–0,0017	0,001–0,002	0,0006–0,0012	0,00034–0,00068
$E_{\Sigma BS}$ [В/м]	0,73–1,6	0,57–1,3	0,36–0,8	0,36–0,8	0,36–0,8	0,36–0,8

Результаты сравнения экспериментальных данных, приведенных в [7], с данными табл. 1, 2 сведены в табл. 3. В этой таблице использованы следующие обозначения:

E_{max} – максимальный зарегистрированный уровень ЭВФ [В/м], E_{min} – минимальный зарегистрированный уровень ЭВФ, E_{av} – средний уровень ЭМФ, E_{Uav} – средний уровень ЭМФ в условиях города, E_{SUav} – средний уровень ЭМФ в условиях пригорода, E_{Rav} – средний уровень ЭМФ в условиях сельской местности; надстрочные ссылки в первом столбце табл. 3 соответствуют номеру ссылки в библиографии [7].

Таблица 3. Результаты верификации (1) по экспериментальным данным [7]

№ п/п	Место и время измерений, источник данных	Результаты измерений	Комментарии и уточнения [11]	Заключение о соответствии результатов оценивания с использованием (1) и опубликованных результатов измерений
1.	Австрия, 2006; Hutter et al. ³	$E_{max} = 1,24$ В/м $E_{Rav} = 0,13$ В/м $E_{Uav} = 0,08$ В/м	Соотношение E_{Rav} и E_{Uav} объясняется тем, что анализ проводился недалеко от БС, а в сельской местности ЭИИМ БС выше, чем на городской территории	Значение E_{max} хорошо согласуется с данными табл. 1. Значения E_{Rav} и E_{Uav} существенно ниже оценочных данных табл. 2, что соответствует пессимистическому характеру оценок (1) и может быть объяснено тем, что измерения проводились недалеко от БС ниже главного лепестка ДН, а также ограничениями на ЭИИМ городских БС
2.	Австрия, 2009; Tomitsch et al. ⁴	$E_{max} = 0,42$ В/м $E_{av} = 0,39$ В/м	Нижняя Австрия, 85 % точек наблюдения – на открытой местности	Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными данными табл. 2
3.	Германия, 2007; Bornkessel et al. ³	$E_{max} = 3,88$ В/м $E_{min} = 0,03$ В/м $E_{av1} = 1,42$ В/м $E_{av2} = 1,31$ В/м	Измерения около БС и в общественных местах (больницы, школы)	Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными данными табл. 1, 2
4.	Италия, 2008; Troisi et al. ⁶	< 1 В/м (68,8 %) 1–3 В/м (22,6 %) 3–6 В/м (6,3 %) 6–20 В/м (2,2 %) > 20 В/м (< 0,1 %)	Данные национальной сети радиомониторинга	97,7 % этих результатов измерений хорошо согласуются с данными табл. 1, 2. Модель (1) не исключает наличия выбросов интенсивности ЭМФ на уровне 6–20 В/м (0,1–1,0 Вт/м ²) и более при измерениях в главном лепестке ДН макро-БС
5.	Испания, 2011; Rufo et al. ⁷	$E_{av} = 0,17$ В/м	Измерения в полосе до 2,2 ГГц, 18 точек – вне помещений, преобладающий вклад мобильной связи	Оценить условия формирования ЭМФ в ситуациях, в которых проводились измерения, невозможно; измеренные уровни ЭМФ на 10–20 дБ ниже оценочных в указанных таблицах, что подтверждает пессимистический характер (1)
6.	Бельгия, Нидерланды и Швеция, 2012; Joseph et al. ^{8,9}	$E_{max} = 3,9$ В/м; $E_{Uav} = 0,74$ В/м $E_{SUav} = 0,46$ В/м $E_{Rav} = 0,09$ В/м	Измерения ЭМФ БС в 311 точках, в т.ч. 68 – внутри помещений и 243 – вне помещений	Эти результаты хорошо согласуются с данными табл. 1, 2 для условий города и пригорода, и на 10–14 дБ ниже оценок таблицы 2 для сельской местности, что соответствует пессимистическому характеру оценок (1)
7.	Греция, 2008; Gotsis et al. ¹⁰	$E_{av} = 1,64$ В/м	Результаты измерений национальной сети мониторинга ЭМП в 46 различных местах	Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными данными табл. 1, 2
8.	Великобритания, 2006; Cooper et al. ¹¹	Измеренные величины – в интервале 0,003–1,8 В/м	Места общего доступа около 20 случайно выбранных БС GSM микро- и пикосайтов	Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными данными табл. 1, 2 для условий города и пригорода
9.	2000–2012; Rowley et al. ¹⁶	Глобальный средний уровень ЭМФ составил $E_{av} = 0,52$ В/м	Результаты измерений уровней ЭМФ от БС СС, проведенных за период 10–11 лет; 173000 измерений (20 стран, 5 континентов)	Анализ охватывает годы, когда уровень развития СС существенно уступал современному уровню, а также результаты измерений в местах с невысокой плотностью абонентов СС; указанный глобальный средний уровень ЭМФ хорошо согласуется с данными табл. 1, 2

Заключение

Сравнение оценок с использованием (1) и экспериментальных данных [5–7] свидетельствует об адекватности модели (1) и ее большой практической значимости. В то же время, принимая во внимание тот факт, что данная верификация модели (1) потребовала прогнозирования ЭМН на территорию, создаваемой системами СС в местах проведения измерений интенсивности ЭМФ [5–7], эта проверка адекватности модели (1) не может быть признана достаточной. В этих целях требуется проведение дополнительных измерений интенсивности ЭМФ в условиях полной доступности объективной информации

об ЭМН на территорию, на которой проводятся измерения. В частности, более глубокие исследования адекватности (1) могут быть выполнены с использованием мобильных систем радиомониторинга и баз регистрационных данных о характеристиках БС СС.

Негативное влияние использования прогнозных значений ЭИИМ БС в каналах GSM и UMTS на объективность верификации (1) с использованием данных [5–7] в значительной мере ослаблено в силу относительно слабой чувствительности оценок интенсивности ЭМФ, выраженных в единицах напряженности ЭМП, к изменению исходных данных об ЭИИМ БС СС, поскольку, например, изменение ЭИИМ БС на 6 дБ (в 4 раза) влечет за собой соответствующее изменение напряженности ЭМФ всего в 2 раза.

В связи с тем, что оценки (1) интенсивности ЭМФ основаны на оценках средней ЭМН на территорию, создаваемой ЭМИ БС СС, данная методика является универсальной и принципиально применима для оценки средней интенсивности ЭМФ при любых соотношениях речевого трафика и трафика передачи данных и для СС всех поколений (3G, 4G, 5G), а также для оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого другими радиослужбами (вещания, навигации и т.п.), что не противоречит рассмотренным выше экспериментальным данным [6, 7].

Список литературы / References

1. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations // Proc. of the IWCMC 2013. Cagliari, Sardinia, Italy, 2013. P. 590–595.
2. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications // Proc. of the «EMC Europe 2016». Wroclaw, Poland, 2016. P. 590–595.
3. Rec. ITU-R P.1411-8. 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.
4. Mordachev V., Loyka S. On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks // IEEE JSAC. 2009. Vol. 27, No. 7. P. 1120–1131.
5. Ozdemir A.R., Alkan M., Gulsen M. Time Dependence of Environmental Electric Field Measurements and Analysis of Cellular Base Stations // IEEE EMC Magazine. 2014. No. 3. P. 43–48.
6. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields / A. Burgi [et al.] // J. of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 2008. Vol. 18. P. 183–191.
7. Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz) / P. Gajsek [et al.] // J. of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 2015. Vol. 25. P. 37–44.
8. Mordachev V., Svistunov A. Reduction of the Radiated Power of Cellular Base Stations on Urban Area at High Intrasystem EMC Requirements // Proc. of the EMC 2015. Dresden, Germany, 2015. P. 1153–1158.
9. Mordachev V., Svistunov A. Required Levels of Radiation Power of GSM Base Stations on Urban Area Taking Into Account Attenuation in Buildings and Intrasystem EMC // Proc. of the «EMC Europe 2016». Wroclaw, Poland, 2016. P. 596–601.
10. Rec. ITU-R M.1390. Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements.
11. Asha Mehrotra. Cellular Radio: Analog and Digital Systems // Artech House Publishers, 1994. P. 422–427.
12. From mobile phone data to the spatial structure of cities / T. Louail [et al.] // Scientific Reports. DOI: 10.1038/srep05276/.
13. Switzerland: Cantons and Cities with population statistics, maps, charts, weather and web information. [Electronic resource]. – URL: <http://www.citypopulation.de/Switzerland-Cities.html> (access date: 08.10.2017).
14. Kanton Basel-Stadt [Electronic resource]. – URL: <http://www.bs.ch/en.html> (access date: 08.10.2017).

Сведения об авторе

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 1.7 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Mordachev V.I., PhD, associate professor, head of SRL 1.7 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. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
phone. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich