

УДК 621.372-758.38:613.168

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, ОБРАЗУЕМОГО СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

В.И. МОРДАЧЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 февраля 2006

Излагается методика системного анализа и приводятся оценки влияния электромагнитного фона, создаваемого сотовыми телефонами других пользователей, системами эфирного телерадиовещания и другими радиообъектами, на ухудшение экологической безопасности сотовых радиосетей, а также влияния массового использования населением средств сотовой радиосвязи на увеличение экологической опасности размещения на территориях современных городов мощных радиотелевизионных передающих центров (телебашен) и других радиообъектов с мощным электромагнитным излучением, создающих интенсивный электромагнитный фон в местах с высокой плотностью населения. Аргументируется необходимость корректировки подходов к нормированию характеристик электромагнитных излучений, предельно допустимых по экологическим соображениям, на основе применения вероятностно-статистических методов нормирования предельно допустимой интенсивности электромагнитного поля, не превышаемой в течение заданного процента времени и/или процента мест.

*Ключевые слова:* сотовая радиосвязь, телерадиовещание, экология, электромагнитный фон.

### Введение

Принято считать [1, 2], что в сотовой сети основной опасностью для здоровья человека является электромагнитное излучение (ЭМИ) персональной абонентской станции (АС) — мобильного (сотового) телефона. Вместе с тем в силу широкого распространения мобильных телефонов значительный интерес представляют также оценки совокупного уровня ЭМИ АС и его сравнение с уровнями ЭМИ от других АС, а также от мощных телевизионных и ОВЧ-ЧМ радиопередатчиков и радиопередатчиков других служб. Очевидно, что наибольший интерес такие оценки представляют для области вблизи земной поверхности, где находится большинство абонентов, а также для мест размещения базовых станций (БС) сотовой радиосети, что важно с точки зрения оценки опасности расширения санитарно-защитных зон БС и, условий их эксплуатации. Выполним эти оценки, используя материалы [3–5].

### Характеристики совокупного уровня ЭМИ АС сотовой радиосети

Если в круговой или сферической пространственной области радиусом  $r_m$  случайно равномерно располагаются АС сотовой сети с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ)  $P_{MS}$ , то в центре этой области плотность распределения вероятностей плотности потока мощности (ППМ)  $P$  от АС имеет вид гиперболического распределения [3]:

$$w(\Pi) = \frac{m\Pi^{\min m/v}}{\nu\Pi^{(m+\nu)/\nu}}, \quad \Pi \geq \Pi_{\min} = \frac{C_\nu P_{MS}}{r_m^\nu}, \quad (1)$$

область радиуса  $r_m$  является областью радиозаметности ЭМИ АС с ЭИИМ  $P_{MS}$  над уровнем  $\Pi_{\min}$ ; параметры этого распределения определены следующим образом:

$m=3$  при объемном размещении источников,  $m=2$  при их поверхностном (территориальном) размещении,  $m=1$  при их "линейном" размещении (вдоль транспортной магистрали, береговой линии, границы и т.п.);

$\Pi_{\min}$  соответствует некоторому минимальному уровню, связанному с величинами  $R_m$  и  $P_{MS}$ ; константа  $C_\nu$  связана с характером распространения радиоволн (РРВ) и определяется из соответствующей модели условий РРВ;

$\nu \geq 2$  — параметр, характеризующий тип РРВ; при свободном РРВ  $\nu=2$ ; при распространении радиоволн у земной поверхности в условиях растительности и городской застройки  $2 < \nu < 12$  [3, 6–10].

При статистической независимости равномерного случайного пространственного размещения АС, а также равновероятной направленности ЭМИ АС данная модель инвариантна к направленным свойствам ЭМИ АС, а также к виду распределения величины  $P_{MS}$  [4,5].

Используя модель (1), можно оценить суммарный уровень ЭМИ от одновременно работающих АС всех сотовых сетей, функционирующих в рассматриваемой пространственной области. Данная задача нетривиальна, поскольку распределение (1) в наиболее интересных с практической точки зрения случаях начальных и центральных моментов не имеет. Исключение составляет случай  $m=3$  (объемное размещение источников ЭМИ) и  $\nu=2$  (РРВ в свободном пространстве). Однако если объемное размещение АС и может быть принято с известной долей условности для плотной высотной застройки делового центра крупного современного города, то условия РРВ в этой ситуации существенно отличаются от условий РРВ в свободном пространстве, по данным [9, 10], вследствие влияния элементов конструкций зданий  $2 < \nu < 12$ .

Распределение (1) при  $m=2$  инвариантно к кривизне земной поверхности и к высоте точки наблюдения над поверхностью. Это, в частности, позволяет оценить суммарный уровень ЭМИ АС в точке размещения БС. При высоте  $H_{BS}$  подвеса антенны БС над поверхностью, позволяющей сузить область определения распределения (1) в силу того, что величина  $H_{BS}$  равна минимально возможному расстоянию между БС и располагаемыми на поверхности АС, математическое ожидание величины  $\Pi$  при использовании модели РРВ Окамура-Хата имеет следующий вид:

$$m_1(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu} (\Pi_{\max}^{1-2/\nu} - \Pi_{\min}^{1-2/\nu})}{\nu - 2} \approx \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu} \Pi_{\max}^{1-2/\nu}}{\nu - 2}; \quad \Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max},$$

$$\Pi_{\max} = \frac{C_\nu P_{MS} \max}{H_{BS}^\nu}, \quad \nu = 4,49 - 0,655 \lg H_{BS}.$$

Очевидно, что суммарный уровень ЭМИ АС в рассматриваемой точке определяется скалярной величиной  $\Pi_\Sigma = m_1(\Pi) N_{cp}$  совокупной ППМ ЭМИ АС.

**Пример.** Если антенна БС сети GSM имеет высоту подвеса  $H_{BS}=60$  м, то при высоте АС над поверхностью 1,5 м и ЭИИМ АС  $P_{MS\max}=2$  Вт площадь зоны покрытия, ограничиваемая чувствительностью РПУ БС и рассчитываемая с использованием модифицированной модели РРВ Окамура-Хата в городской застройке (urban area), составляет примерно 30–35 км<sup>2</sup> при использовании диапазона 900 МГц и примерно 15 км<sup>2</sup> при использовании диапазона 1800 МГц. Тогда с учетом данных табл. 1, содержащей прогнозируемые значения пространственной плотности АС, не превышающей 10<sup>6</sup> ед/км<sup>3</sup> [11, 12], можно предположить возможность нахождения в этой зоне до нескольких миллионов владельцев АС, и до  $N_{cp}=100\,000$  АС в активном состоянии. В результате для этой ситуации получим  $\Pi_\Sigma \approx (10^9 - 10^{10}) \Pi_{\min}$ . Эти условия эксплуатации БС следует признать достаточно сложными (работоспособность обеспечивается пространственной

и частотной избирательностью, а также высокой линейностью приемного радиотракта БС), однако с экологической точки зрения полученный уровень безопасен, поскольку вероятность нахождения людей непосредственно вблизи от БС в направлении максимума ее ЭМИ, как правило, принципиально исключена. Действительно, реальная чувствительность БС "по полю" имеет порядок  $P_{min}=10^{-17}-10^{-15}$  Вт/см<sup>2</sup> в зависимости от уровня внутрисетевой помехи. С учетом этого уровень эквивалентной совокупной ППМ  $P_{\Sigma} \leq (10^{-7}-10^{-5})$  Вт/см<sup>2</sup>, т.е. не превышает допустимого электромагнитного фона, регламентируемого действующими нормами [13, 14]. Исключение могут составлять ситуации, характерные для верхних этажей зданий, располагаемых на высотах, соизмеримых с  $H_{BS}$  и попадающих в зону главного лепестка диаграммы направленности ЭМИ БС. В этих ситуациях, когда уровень электромагнитного фона  $P_{\Sigma}$  приближается к значению  $(10^{-6}-10^{-5})$  Вт/см<sup>2</sup>, определение размеров санитарно-защитной зоны БС по методике [13, 4] без учета электромагнитного фона представляется некорректным.

### Характеристики преобладающего по уровню ЭМИ АС

Отсутствие у распределения (1) начальных и центральных моментов при  $(m+v)/v \leq 2$  означает, что в выборке случайных величин  $P$ , как правило, присутствует преобладающее по величине значение, определяемое излучением ближайшей АС, принадлежащей другому пользователю. В этом случае можно считать, что суммарный уровень ЭМИ в точке наблюдения практически соответствует уровню ЭМИ ближайшей АС, что позволяет выполнить соответствующие оценки с использованием подхода [4,5], развитого применительно к статистическим оценкам ожидаемого динамического диапазона сигналов в пространственно-распределенных группировках радиосредств.

Динамический диапазон  $D=P_{max}/P_{min}$  сигналов в точке наблюдения - это отношение ППМ преобладающего по уровню сигнала к некоторому пороговому уровню. В соответствии с [4,5] вероятность  $p_D$  того, что величина  $D$  не будет превышена, определяется простым соотношением:

$$p_D = \exp(-N_0 D^{-m/v}). \quad (2)$$

Здесь параметр  $N_0$  имеет смысл условного среднего числа АС-источников ЭМИ в некоторой гипотетической круговой (сферической) области радиусом

$$R_m = \sqrt{\frac{P_{MS}}{4\pi P_{min}}}.$$

Эта область может быть определена как условная область радиозаметности АС, ограниченная чувствительностью  $P_{min}$ , величиной ЭИИМ АС  $P_{MS}$  и условиями РРВ в рассматриваемую точку пространства от ближайшей АС. Последнее отличает эту область от области радиусом  $r_m$ , в пределах которой условия РРВ и пространственная плотность АС принимаются постоянными (границы адекватности модели (1)). Параметр  $N_0$  определяется при следующих двух условиях:

1) при условии, что средняя пространственная плотность АС-источников ЭМИ во всей этой области постоянна и равна средней плотности  $\rho$  [единиц/км<sup>2</sup> при  $m=2$  и единиц/км<sup>3</sup> при  $m=3$ ] случайного пространственного размещения АС-источников ЭМИ в окрестности рассматриваемой точки пространства (в окрестности центра области радиуса  $R_m$ );

2) при условии, что величина  $R_m$  определена исходя из модели условий РРВ, адекватной для РРВ между рассматриваемой точкой пространства и ближайшей к ней АС-источнику ЭМИ (очевидно, что определенная таким образом величина  $R_m$  будет существенно больше истинного радиуса  $r_m$  зоны радиозаметности АС).

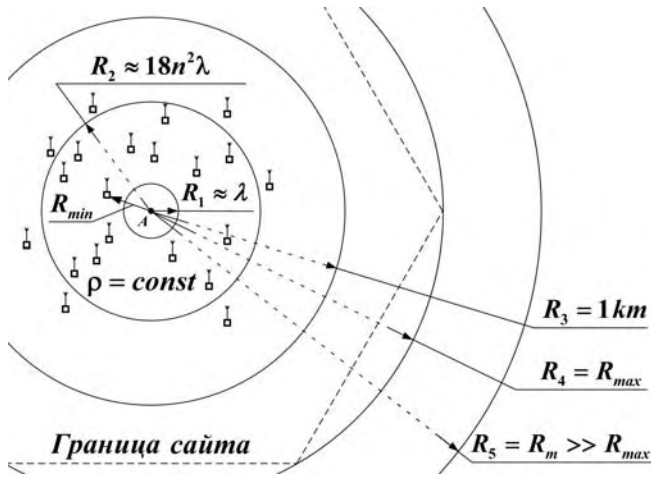


Рис. 1. Условные границы применимости моделей условий РРВ в полосах частот сотовой радиосвязи; величина  $R_2$  определена для равенства высот размещения точки наблюдения  $h_A$  и АС  $h_{MS}$  над поверхностью:  $h_A = h_{MS} = n\lambda$

стояние до первого интерференционного максимума, может использоваться модель РРВ Введенского [16], для которой  $\nu=4$ . На расстояниях, превышающих  $R_3=1$  км, могут использоваться модели РРВ Окамура–Хата ( $\nu=3,5-4$ ) и ряд других моделей, определенных Рекомендациями МСЭ (№№ 370, 1146, 1546, и др.). Радиус сайта  $R_4=R_{max}$  может превышать величину  $R_3$  (как показано на рис. 1), либо находиться внутри этой области (для микро- и пикосотовых структур), однако в любом случае модели РРВ с  $\nu=3,5-4$  оказываются применимыми для расчетов, связанных с определением величины  $R_{max}$  и оценками границ зон ответственности БС.

С экологической точки зрения наибольший интерес представляет внутренняя часть области  $R_1 < R < R_2$ , в которой размещены ближайшие АС и имеет место прямая видимость между исследуемой точкой пространства и ближайшими АС. Преобладающее по уровню ЭМИ в точке  $A$  формируется ближайшей АС, удаленной от этой точки на некоторое расстояние  $R_{min}$  (рис. 1). Поэтому в данном случае логичным является применение по крайней мере в области  $R_1 < R \leq R_{min}$  модели РРВ в свободном пространстве ( $\nu=2$ ,  $C_\nu=1/4\pi$ ).

Таким образом, параметр  $N_0$  в (2) определяется как произведение площади (объема) области радиозаметности АС при РРВ в свободном пространстве на среднюю пространственную плотность АС в центре этой области:

$$N_0 = \frac{\rho \pi^{m/2} R_m^m}{\Gamma(1 + m/2)}, \quad m = 1, 2, 3.$$

В частности, при  $m=2$ ,  $\nu=2$  имеем  $N_0 = \pi R_m^2 \rho$ , и

$$p_D(P_{MS}) = \exp\left(-\frac{N_0}{D}\right) = \exp\left(-\frac{\rho P_{MS}}{4\pi_{max}}\right) = \exp(-\rho \pi r_{min}^2) = \exp(-N_{MS}(r_{min})), \quad (3)$$

где  $N_{MS}$  имеет смысл среднего числа АС с ЭИИМ  $P_{MS}$  в некоторой окрестности точки  $A$  радиуса  $r_{min}$ ; вероятность  $p_D(P_{MS})$  представляет собой вероятность того, что ближайшая к точке  $A$  АС с ЭИИМ  $P_{MS}$  находится за пределами этой окрестности, т.е. вероятность того, что  $R_{min} > r_{min}$ .

При наличии в сети регулировки мощности ЭМИ АС величина  $P_{MS}$  оказывается случайной, и в нашем случае ( $R_{max} > R_2$ ,  $\nu=4$ ) распределенной по закону [17]

$$w(P_{MS}) = \frac{1}{2\sqrt{P_{MSmax} P_{MS}}}, \quad 0 < P_{MS} \leq P_{MSmax}.$$

Поясним последнее условие, обратившись к рис.1, на котором показаны границы применимости тех или иных моделей РРВ при территориальном размещении АС ( $m=2$ ). Точка  $A$  в центре рисунка – некоторая произвольно выбранная точка, характеристики ЭМИ в которой нас интересуют. В ее окрестности случайно со средней плотностью  $\rho = \text{const}$  располагаются АС — источники ЭМИ. В нашем случае интерес представляет ситуация, когда плотность  $\rho$  АС в рассматриваемой области велика. На удалении  $R_1$  точки  $A$  от АС, соизмеримом с длиной волны  $\lambda$ , формируется плоская волна [15]; вероятностью присутствия посторонних АС в окрестности радиуса  $R_1 \approx \lambda \approx 15-50$  см можно пренебречь. На удаленностях АС от рассматриваемой точки  $R > R_2$ , превышающих рас-

с математическим ожиданием  $m_1(P_{MS})=P_{MSmax}/3$ . Учитывая случайность ЭИИМ АС, получим выражение для вероятности непревышения уровня  $\Pi_{max}$  уровнем преобладающего по ППМ в рассматриваемой точке пространства ЭМИ АС [18]

$$P_D = \int_0^{P_{MSmax}} \exp\left(-\frac{\rho P_{MS}}{4\Pi_{max}}\right) w(P_{MS}) dP_{MS} = \frac{2\sqrt{\Pi_{max}}}{\sqrt{\rho P_{MSmax}}} \int_0^{\sqrt{\frac{\rho P_{MSmax}}{4\Pi_{max}}}} \exp(-t^2) dt. \quad (4)$$

Особый интерес представляет случай, когда территория, на которой функционирует сотовая радиосеть, дополнительно облучается ("подсвечивается") одним или несколькими мощными радиопередатчиками. Например, это имеет место, если на территории города размещается радиотелевизионный передающий центр с высотной телебашней, либо если группы мощных радиопередатчиков телевизионного и ОВЧ ЧМ вещания располагаются на высотных зданиях в пределах городской застройки.

При наличии в рассматриваемой точке пространства электромагнитного фона с интенсивностью  $\Pi_0$ , не достигающей установленных Нормами [13, 14, 19] предельно допустимых уровней (ПДУ), принципиальный интерес представляют статистические характеристики совокупной ППМ  $\Pi_m = \Pi_0 + \Pi_{max}$  как скалярной суммы интенсивности фонового ЭМИ и преобладающего по энергетике ЭМИ АС. Подстановкой в (4)  $\Pi_{max} = \Pi_m - \Pi_0$  получим вид функции распределения вероятности совокупной ППМ  $\Pi_m$  ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (произвольное число сотовых радиосетей) при заданной интенсивности электромагнитного фона  $\Pi_0$ :

$$P_D(\Pi_m) = \frac{2\sqrt{\Pi_m - \Pi_0}}{\sqrt{\rho P_{MSmax}}} \int_0^{\sqrt{\frac{\rho P_{MSmax}}{4(\Pi_m - \Pi_0)}}} \exp(-t^2) dt. \quad (5)$$

В заключение рассмотрим уровень электромагнитного фона, создаваемого в точке А (рис. 1) от АС, располагаемых в ее окрестности радиуса  $R_2$ , точнее, в области  $R_1 < R < R_2$ . Для этой области  $\nu=2$ , и с учетом (1) совокупный уровень ЭМИ АС, располагаемых в этой области со средней плотностью  $\rho$  (ед./м<sup>2</sup>), определяется соотношением

$$\Pi_{\Sigma}(R < R_2) \approx \frac{\rho}{2} m_1(P_{MS}) \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (6)$$

За пределами этой области условия РРВ усложняются ( $\nu \approx 4$ ), и для случая равномерного случайного размещения АС-источников ЭМИ в области  $R_2 < R < R_{max}$  с плотностью  $\rho'$  (ед./м<sup>2</sup>) совокупный уровень электромагнитного фона от АС, расположенных в этой области, будет равен

$$\Pi_{\Sigma}(R \geq R_2) \approx 5R_{max}^2 \rho' \Pi_{min}. \quad (7)$$

Соотношения (3), (4) позволяют оценить опасность превышения интенсивностью преобладающего по энергетике ЭМИ АС некоторого заданного уровня в произвольной точке области обслуживания сотовой связью, соотношение (5) позволяет оценить опасность превышения совокупной ППМ в произвольной точке этой области некоторого установленного ПДУ при условии присутствия в этой точке электромагнитного фона с уровнем ниже ПДУ, соотношения (6),(7) обеспечивают возможность оценки уровня дополнительного электромагнитного фона, создаваемого ЭМИ АС, располагаемых в окрестности точки наблюдения и в области ее фактической радиовидимости. Последнее принципиально важно с точки зрения возможности объективной оценки экологической опасности возведения на территории населенных пунктов мощных радиообъектов, создающих повышенный электромагнитный фон (в частности, радиотелевизионных башен) в условиях массового применения средств мобильной связи, а также с точки зрения оценки экологической опасности использования средств мобильной радиосвязи в электромагнитной обстановке современного города, сформированной системами эфирного телера-

диовещания, радиолокационными и радиорелейными системами и другими ранее введенными в эксплуатацию мощными источниками ЭМИ.

### Результаты анализа

В качестве примеров на рис. 2. приведены зависимости вероятности неперевышения интенсивностью ЭМИ ближайшей АС уровня  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, от пространственной плотности АС-источников ЭМИ; на рис. 3 приведены зависимости от пространственной плотности АС-источников ЭМИ вероятности неперевышения интенсивностью ЭМИ ближайшей АС электромагнитного фона интенсивностью  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>.

На рис. 4 приведены кривые функции распределения вероятности совокупной ППМ  $p_D(P_m)$  ЭМИ в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (произвольное число сотовых радиосетей) при интенсивности электромагнитного фона  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>, на рис. 5 приведены кривые функции распределения  $p_D(P_m)$  для интенсивности электромагнитного фона  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, на рис. 6 приведены кривые функции распределения  $p_D(P_m)$  для интенсивности электромагнитного фона на 1 дБ ниже ПДУ  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>. С учетом того, что по данным [1] "безопасный для жизни человека электромагнитный фон составляет по интенсивности  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>";

в соответствии с [13, 14] предельно допустимый для населения уровень фонового ЭМИ, создаваемого радиотехническими объектами (радиотелевизионными передатчиками, РЛС, РРС и т.п.), составляет  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>;

в соответствии с [19] ПДУ ЭМИ АС, воздействующего на организм владельца АС, ограничен значением  $P_0 = 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>;

по данным [11, 12] (см. табл.1) пространственные плотности АС могут достигать уровня 0,01 ед/м<sup>2</sup> в помещениях деловых центров, уровня 0,1 ед/м<sup>2</sup> в местах массового скопления народа (торговые центры, места проведения политических мероприятий и спортивных соревнований и т.п.), до 0,001–0,01 ед/м<sup>2</sup> в пешеходных зонах;

при размещении на территории крупных населенных пунктов мощных передающих центров эфирного телерадиовещания типовой является ситуация, когда на значительных территориях городской застройки планируемый и/или фактический уровень электромагнитного фона незначительно (всего на 1–3 дБ) ниже ПДУ, установленного [13, 14];

в ближайшие годы следует ожидать практически полного охвата всего населения услугами сотовой радиосвязи,

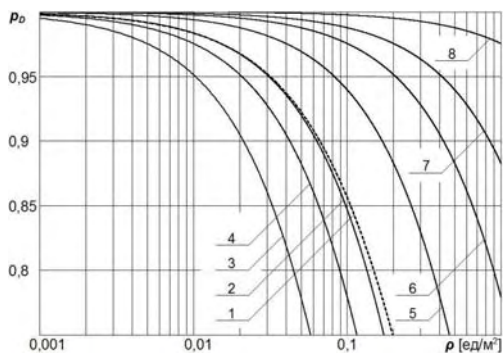


Рис. 2. Зависимость вероятности неперевышения интенсивностью ЭМИ ближайшей АС уровня  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, определенного Нормами [13, 14] в качестве предельно допустимого (ПДУ) для населения, от пространственной плотности АС

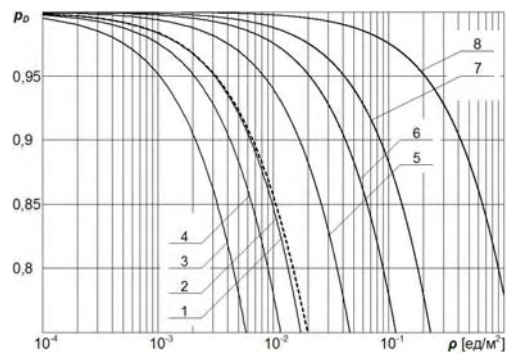


Рис. 3. Зависимость вероятности неперевышения интенсивностью ЭМИ ближайшей АС электромагнитного фона интенсивностью  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> от пространственной плотности АС-источников ЭМИ: кривые 1 соответствуют модели (4) в случае использования АС GSM 4-го класса мощности ( $P_{MS} \leq 2$  Вт) при идеальной регулировке ЭИИМ АС в сети; кривые 2 получены с использованием модели (3) для среднего значения ЭИИМ АС ( $m_f(P_{MS}) = 0,67$  Вт); кривые 3–8 получены с использованием модели (3) для значений  $P_{MS}$  соответственно 2 Вт, 1 Вт, 0,25 Вт, 0,1 Вт, 50 мВт и 10 мВт

Таблица 1. Уровни ЭМИ в городских условиях

Условия эксплуатации сети	Плотность населения (потенциальных пользователей) в зоне обслуживания	
	Плотность населения согласно [11], чел./км <sup>2</sup>	Плотность населения согласно [12], чел./км <sup>2</sup>
Деловой центр города/город в помещении (CBD/Urban in building)	250000	180000
Пригород в помещении или на улице (Suburban in building or on street)		7200
Жилые районы города в помещении (Home in building)		380
Город/пешеходы (Urban pedestrian)	100000	108000
Город/автомобили (Urban vehicular)	3000	2780
Сельская местность/внутри и вне помещения (Rural in- & out-door)		36

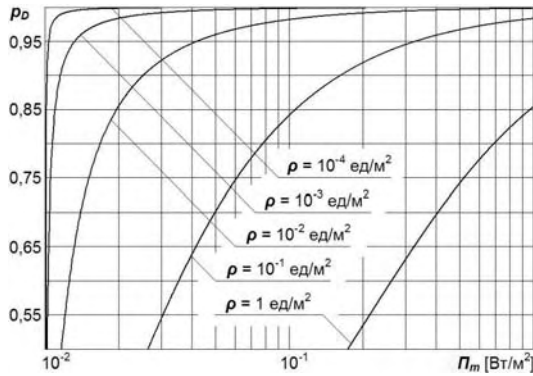


Рис. 4. Кривые функции распределения вероятности совокупной ППМ  $P_m$  ЭМИ в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (произвольное число сотовых радиосетей) при интенсивности электромагнитного фона  $P_0=10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> ( $10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>)

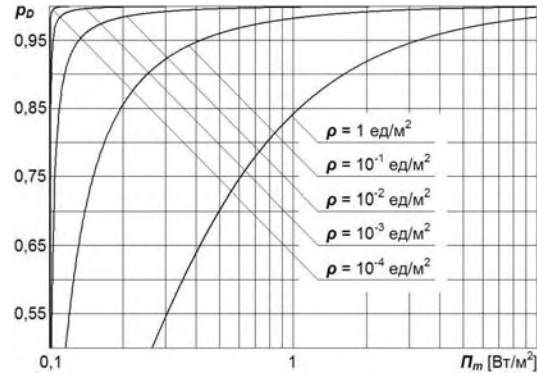


Рис. 5. Кривые функции распределения вероятности совокупной ППМ  $P_m$  ЭМИ в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (произвольное число сотовых радиосетей) при интенсивности электромагнитного фона  $P_0=10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> ( $0,1$  Вт/м<sup>2</sup>)

анализ приведенных кривых позволяет заметить следующее.

1. В отсутствие электромагнитного фона вероятность превышения интенсивностью ЭМИ ближайших АС уровня  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> в произвольной точке в произвольный момент времени составляет 0,02 при  $\rho=0,01$  ед/м<sup>2</sup> и достигает 0,14 при  $\rho=0,1$  (рис. 2). Последнее означает, что в принятых условиях (места массового скопления народа,  $\rho=0,1$ ) в произвольный момент времени для каждых 10–15 человек из ста уровень ЭМИ от ближайших АС превысит ПДУ электромагнитного фона, установленный для населения нормами [13, 14].

2. В отсутствие электромагнитного фона вероятность превышения интенсивностью ЭМИ ближайших АС уровня  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> составляет 0,02 при  $\rho=0,001$  ед/м<sup>2</sup> и достигает 0,14 при  $\rho=0,01$  (рис. 3) и 0,6 при  $\rho=0,1$ . Последнее означает, что в принятых условиях (места массового скопления народа,  $\rho=0,1$ ) в произвольный момент времени для каждых 60 человек из ста уровень ЭМИ от ближайших АС превысит безопасный для жизни человека уровень электромагнитного фона [1].

3. Для малых значений вероятности превышения интенсивностью ЭМИ ближайшей АС заданного уровня  $P_0$  ( $p_D \geq 0,9$ ) вместо сложной модели (4) можно пользоваться моделью (3) с подстановкой среднего значения ЭИИМ АС. Для этого случая

$$p_D \approx 1 - \frac{\rho P_{MS \max}}{12P_0}. \quad (8)$$

4. Массовое применение маломощных радиointерфейсов типа Bluetooth, Dect ( $P_{MS}=10$  мВт) также может представлять серьезную экологическую опасность. Так, вероятность  $p(P_m > P_0)$  превышения интенсивностью ЭМИ этих устройств уровнями  $P_0 = 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> и  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> принимает следующие значения:

$\rho$ , ед/м <sup>2</sup>	$p(P_m > P_0) = 1 - p_D$	
	$P_0 = 10^{-6}$ Вт/см <sup>2</sup>	$P_0 = 10^{-5}$ Вт/см <sup>2</sup>
1	0,22	0,025
0,1	0,025	0,0025
0,01	0,0025	0,00025
0,001	0,00025	–

Следует подчеркнуть, что, например, вероятность  $p(P_m > P_0) = 0,0025$  в правом столбце означает, что при массовом применении этих радиоинтерфейсов в плотной городской застройке деловых центров и жилых кварталов в произвольный момент времени в среднем для каждых 25 человек из 10 тысяч уровень электромагнитного фона будет превышать ПДУ даже без учета ЭМИ других источников (станции эфирного телерадиовещания, АС сотовой связи, бытовая техника и т.п.).

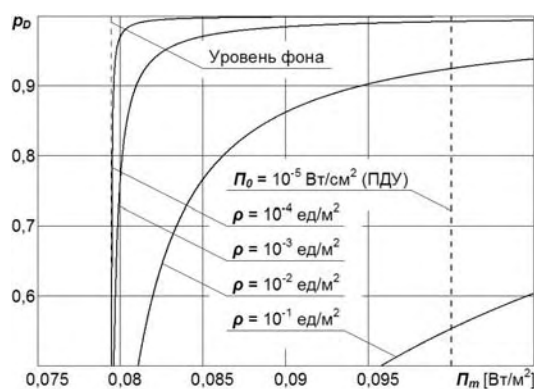


Рис. 6. Кривые функции распределения вероятности совокупной ПМ  $P_m$  ЭМИ в произвольной выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (произвольное число сотовых радиосетей) при интенсивности электромагнитного фона на 1 дБ ниже ПДУ  $P_0 = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> (0,1 Вт/м<sup>2</sup>)

[13, 14]) предельно допустимый в соответствии с [19] уровень  $10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> превышает в произвольный момент времени в произвольной точке пространства за счет присутствия ЭМИ соседних АС с вероятностью 0,02 при  $\rho = 0,1$  (рис. 5) и с вероятностью 0,002 при  $\rho = 0,01$ .

6. В присутствии электромагнитного фона интенсивностью на 1–3 дБ ниже ПДУ фона для населения опасность превышения совокупной интенсивностью электромагнитного поля этого ПДУ ( $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>) оказывается вполне реальной (рис. 6). Для этих ситуаций вероятность  $p(P_m > P_0)$  превышения совокупной интенсивностью ЭМИ указанного ПДУ принимает следующие значения:

Эти данные свидетельствуют о том, что при массовом охвате населения средствами мобильной связи доля этих средств в формировании совокупного электромагнитного фона оказывается значительной, что, по-видимому, требует пересмотра критериев [13, 14] допустимости размещения в населенных пунктах мощных источников радиоизлучения (станции эфирного телерадиовещания, мощные РЛС и т.п.).

$\rho$ , ед/м <sup>2</sup>	$p(P_m > P_0) = 1 - p_D$		
	$P_0$ ниже ПДУ на 1 дБ	$P_0$ ниже ПДУ на 2 дБ	$P_0$ ниже ПДУ на 3 дБ
1	0,82	0,776	0,72
0,1	0,445	0,315	0,26
0,01	0,075	0,043	0,032
0,001	0,008	0,0045	0,0033
0,0001	0,0008	0,00045	0,00033

8. Средний уровень электромагнитного фона, создаваемого в точке наблюдения средствами мобильной связи, располагаемыми на относительно небольшом удалении (в области

5. В присутствии электромагнитного фона интенсивностью  $10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> ПДУ  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, установленный [13, 14], превышает в произвольной точке пространства в произвольный момент времени за счет присутствия ЭМИ АС с вероятностью 0,02 при  $\rho = 0,01$  и с вероятностью 0,16 при  $\rho = 0,1$  (рис. 4). Для этой интенсивности фона уровень  $2 \cdot 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>, принятый в качестве ПДУ мэриями Москвы и Парижа [23], превышает с вероятностью 0,02 при  $\rho = 0,001$ , с вероятностью 0,15 при  $\rho = 0,01$  и с вероятностью 0,55 при  $\rho = 0,1$ . При этих условиях уровень  $10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> (ПДУ ЭМИ АС) превышает в произвольной точке пространства за счет присутствия ЭМИ АС других абонентов с вероятностью 0,02 при  $\rho = 0,01$  и с вероятностью 0,002 при  $\rho = 0,1$ .

В присутствии электромагнитного фона интенсивностью  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> (ПДУ в соответствии с



$R_1 < R < R_2$  вокруг точки  $A$  на рис. 1), также может быть весьма значительным. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда в окрестности рассматриваемой точки распределены АС сети GSM-900:  $m_1(P_{MS})=0,67$  Вт,  $R_2=100$  м. Используя (6), получим  $\Pi_{\Sigma}(R < R_2) \approx 2\rho$ , если территориальная плотность АС  $\rho$  выражена в (ед/м<sup>2</sup>), а величина  $\Pi_{\Sigma}(R < R_2)$  выражена в (Вт/м<sup>2</sup>). Нетрудно убедиться, что при  $\rho=0,1$  ед/м<sup>2</sup> средний уровень электромагнитного фона, создаваемого в точке наблюдения средствами мобильной связи, располагаемыми вокруг этой точки в окрестности  $R < R_2$ , вдвое превысит ПДУ, установленный нормами [13, 14], а при  $\rho=0,01$  ед/м<sup>2</sup> составит 20 % от ПДУ, что также, безусловно, следует учитывать при оценке границ санитарно-защитных зон мощных радиообъектов.

Что касается среднего уровня электромагнитного фона, создаваемого в точке наблюдения средствами мобильной связи, располагаемыми на значительном удалении (в области  $R_2 < R < R_{\max}$  вокруг точки  $A$  на рис. 1), то эта компонента электромагнитного фона может быть оценена с использованием (7). В качестве примера рассмотрим типовую ситуацию:  $R_{\max} \approx 3-4$  км,  $\Pi_{\min} \approx 10^{-11}$  Вт/м<sup>2</sup>. В этой ситуации  $\Pi_{\Sigma}(R_2 < R < R_{\max}) \approx 10^{-3}\rho'$ , если территориальная плотность АС выражена в [ед/м<sup>2</sup>], а совокупная ППМ выражена в [Вт/м<sup>2</sup>]. Учитывая, что интерес представляет случай  $\rho' \leq \rho$ , эта компонента на 3–4 порядка меньше, чем  $\Pi_{\Sigma}(R < R_2)$ , однако принципиально возможны ситуации, когда и ее влияние может оказаться существенным.

Использованные при расчетах значения средней пространственной плотности АС-источников ЭМИ опираются на заслуживающие доверия прогнозы [11,12] (см. табл.1), поэтому в свете приведенных выше оценок влияние электромагнитного фона на экологическую безопасность сотовых радиосетей в условиях современного города (равно как и влияние сотовых радиосетей на экологическую безопасность радиотехнических объектов, размещаемых в городской застройке) представляется заслуживающим безусловного внимания.

### Характеристика полученных результатов

Полученные результаты могут быть приняты в качестве предварительных (первичных) оценок, позволяющих сформировать достаточно объективный взгляд на проблему экологической безопасности радиосистем информационного обслуживания населения в условиях их совместного функционирования. Поскольку данная работа является первой попыткой такого рода, в ней принят ряд допущений, практически не снижающих объективности приведенных результатов, но подлежащих учету в дальнейшем. К таким допущениям, в частности, могут быть отнесены следующие.

1. Использованное выше значение максимальной ЭИИМ АС  $P_{MS\max}=2$  Вт соответствует стандартизованному номинальному значению максимальной выходной мощности АС GSM-900 четвертого класса мощности [20]. Однако диаграмма направленности (ДН) ЭМИ АС отличается от ДН ЭМИ изотропного излучателя — в направлении, перпендикулярном к оси антенны АС, реальная интенсивность ЭМИ АС может быть на 1–2 дБ выше. Кроме того, для АС пятого класса мощности  $P_{MS\max}=0,8$ Вт, для АС GSM-1800 и для АС других стандартов (IMT-МС-450, CDMA-2000, UMTS) требуется использовать другие значения максимальной излучаемой мощности. Наконец, в развитых сотовых сетях, где размеры сайтов невелики, реальная величина  $P_{MS\max}$  может быть значительно ниже величины, обеспечиваемой в соответствии с техническими характеристиками АС.

2. Соотношения (3)–(8) получены в начальном предположении круговой ДН ЭМИ АС, хотя при равновероятной ориентации системы "голова человека — АС" в силу безграничной делимости пуассоновского распределения эти оценки инвариантны к направленности ЭМИ, создаваемого этой системой. Тем не менее голова человека экранирует ЭМИ, и реальная ДН ЭМИ АС существенно отличается от круговой. При этом часть ЭМИ отражается, что приводит к росту интенсивности ЭМИ АС в направлении, противоположном направлению на голову абонента, а значительная часть ЭМИ АС поглощается в тканях человеческого тела, что приводит к провалу ДН ЭМИ АС в соответствующем направлении и к некоторому снижению средней интенсивности ЭМИ АС.

3. При реальной ступенчатой регулировке мощности ЭМИ АС ее среднее значение оказывается больше значения  $m_1(P_{MS})=P_{MS\max}/3$  [21, 22], так что совокупное увеличение реальной

интенсивности ЭМИ АС по сравнению с рассматриваемой идеализированной ситуацией может достигать 1–3 дБ.

4. Приведенные выше оценки опираются на прогнозы [11, 12] средней пространственной плотности АС в различных ситуациях, а также на общепринятые оценки [7] интенсивности функционирования АС во времени. Однако эти оценки выполнены достаточно давно, сегодня пространственная плотность АС мобильной связи фактически достигает плотности населения и даже превышает ее, расширение возможностей радиосетей по передаче данных в сочетании со снижением тарифов, стимулирующим увеличение интенсивности и продолжительности телефонных разговоров, приводят к необходимости пересмотра этих прогнозов и оценок, особенно с учетом эволюционирования систем мобильной связи к уровню 3G и масштабной разработки облика систем информационного обслуживания населения четвертого поколения (4G), а также все более интенсивного использования интерактивных систем беспроводного доступа и радиointерфейсов различного назначения (Bluetooth, Dect и т.п.).

5. Приведенные выше оценки (3)–(8) получены с использованием известных моделей условий РРВ в свободном пространстве ( $\nu=2$ ), модели Введенского ( $\nu=4$ ) и модифицированной модели Окамура–Хата ( $\nu=3,5-4$ ). Однако эти модели, возможно, не в полной мере адекватны рассматриваемой задаче, поскольку по крайней мере в окрестности  $R < R_2$  точки наблюдения (рис. 1) при высокой пространственной плотности абонентов требует дополнительного изучения вопрос о влиянии присутствия последних, а также о влиянии других факторов (например, переотражений радиоволн) на характер РРВ в этой области.

6. Приведенные выше оценки получены в предположении постоянства средней пространственной плотности АС. При необходимости они могут быть обобщены на случай произвольной функции средней пространственной плотности АС от координат с использованием подхода [3–5].

Как указанные выше моменты, так и любые другие аспекты, учет которых способен уточнить приведенные выше оценки, по мнению автора, должны явиться предметом дальнейших исследований.

### Заключение

В целом соотношения (2)–(8) позволяют в первом приближении сопоставить влияние на человеческий организм ЭМИ собственной АС и "фона", создаваемого ЭМИ АС других пользователей как своей, так и всех других сотовых сетей, а также

оценить влияние электромагнитного фона, создаваемого системами эфирного телерадиовещания и другими радиообъектами, на ухудшение экологической безопасности сотовых радиосетей;

оценить влияние массового использования населением средств сотовой радиосвязи на увеличение экологической опасности возведения на территориях современных городов мощных радиотелевизионных передающих центров (телебашен) и других радиообъектов с мощным ЭМИ, создающих интенсивный электромагнитный фон в местах с высокой плотностью населения.

Подобные сопоставительные оценки могли бы быть существенно уточнены как с использованием данных от систем радиомониторинга в крупных городах, так и с использованием более сложных методик экспериментальных исследований, предусматривающих измерение энергетических и временных параметров электромагнитного фона в различных условиях (на открытой местности в местах массового скопления людей, в бытовых помещениях, в деловых центрах и т.п.).

Тем не менее приведенные соотношения и оценки, по мнению автора, свидетельствуют о следующем.

Принятые способы нормирования предельно допустимых с точки зрения экологии уровней ЭМИ АС (в форме задания абсолютных значений ППМ ЭМИ или величины SAR) адекватны задаче ограничения воздействия ЭМИ АС на здоровье их владельцев, поскольку условия воздействия ЭМИ АС на человека являются типовыми – в активном режиме АС, как правило (и в наихудшем случае), располагается очевидным традиционным образом у головы абонен-

та; относительное время нахождения АС в активном состоянии, как правило, не превышает 2-5 % (не более 1 ч в сутки).

Вместе с тем значительная часть населения не может пользоваться услугами сотовой связи по принципиальным соображениям (дети младшего и лица очень преклонного возраста; лица, болезненно воспринимающие ограничение сотовой связью личной свободы либо присутствие у собственного уха источника ЭМИ; немущие и т.п.). Для этих слоев населения ограничения воздействия ЭМИ на здоровье (ограничения вынужденного экологического риска [23]) должны учитывать и влияние электромагнитного "фона", обусловленного как массовым применением АС сотовой связи, так и другими источниками ЭМИ (мощные радиопередатчики эфирного теле- и радиовещания, связи и передачи данных; микроволновые печи, компьютеры и т.п.). Очевидно, что постоянное присутствие этого в ряде случаев достаточно интенсивного "фона" вряд ли прибавляет здоровья и владельцам АС.

В целом электромагнитный "фон", образуемый как ЭМИ АС при их массовом применении, так и ЭМИ других технических объектов, может быть принят состоящим из двух достаточно различных по характеру аддитивных компонент:

1. Квазистационарный квазидетерминированный электромагнитный "фон", образуемый ЭМИ мощных радиопередатчиков вещания и связи (в том числе БС сотовых сетей), дисплеев, телевизоров, бытовой техники и т.п. Места размещения источников этих ЭМИ стационарны, их уровни достаточно стабильны, периоды относительного постоянства (интервал корреляции) определяются такими временными интервалами, как время непрерывной работы телевизора, время работы за компьютером, время работы вещательного радиопередатчика и т.п.

2. Случайный динамично меняющийся электромагнитный процесс с интервалом корреляции, определяемым интенсивностью перехода АС в активное состояние, и обусловленный массовым функционированием случайного числа АС.

По-видимому, различный характер этих компонент указывает на необходимость различных подходов к нормированию их характеристик, предельно допустимых по экологическим соображениям. Если нормирование уровня квазистационарной квазидетерминированной компоненты может осуществляться традиционным образом, так как это предусмотрено действующими Санитарными Правилами и Нормами [13,14,19], то нормирование уровня второй случайного динамично изменяющейся компоненты должно осуществляться вероятностно-статистическими методами по правилам, используемым, например, при нормировании уровней помех для радиосистем различного назначения [24-26]. В соответствии с этими правилами нормируется некоторый предельно допустимый уровень напряженности (или ППМ) электромагнитного поля от отдельного радиосредства либо эквивалентной совокупной ППМ, создаваемой группой РЭС, не превышаемый в течение заданного процента времени и/или процента мест.

Очевидно, что обоснование как величины нормируемого предельно допустимого уровня эквивалентной совокупной ППМ от АС сотовых сетей, так и процентов времени/мест, в течение которых не допускается превышение этого уровня, представляет собой отдельную достаточно сложную, трудоемкую и многоплановую задачу. Решение этой задачи в ближайшем будущем крайне необходимо в связи с массовым охватом населения средствами и услугами мобильной радиосвязи, интенсивным развитием интерактивных систем беспроводного радиодоступа, интенсивным применением бесшнуровых телефонов и микроволновых радиоинтерфейсов в условиях продолжающегося развития систем эфирного телерадиовещания и других радиослужб, а также насыщения жилых помещений бытовой и компьютерной техникой, создающей ЭМИ.

В этих условиях, по мнению автора, содержащиеся в данной работе результаты и выводы свидетельствуют о необходимости отказа от размещения на территории населенных пунктов с высокой плотностью населения мощных систем эфирного вещания в пользу перехода к альтернативным пространственно-распределенным или кабельным/волоконно-оптическим системам раздачи ТВ и вещательных программ, поскольку здесь реально существует возможность альтернативных технических решений, в то время как мобильная радиосвязь принципиально безальтернативна.

Наконец, развитие основных положений и принципов системной экологии сотовых радиосетей и других радиосистем, частично изложенных в [17, 21, 22] и в данной работе, позволит создать предпосылки для уменьшения экологического риска при использовании средств мобильной связи техническими мерами, например, за счет введения в системе возможностей взаимного опроса ближайших АС, ограничений функциональности АС в условиях мощного ЭМИ соседней АС и т.п., а также за счет совершенствования этики использования средств мобильной связи в различных условиях.

## ESTIMATION OF ECOLOGICAL HAZARD OF ELECTROMAGNETIC FIELDS PRODUCED BY MEANS OF PUBLIC INFORMATION SERVICES

V.I. MORDACHEV

### Abstract

It is stated the methods of systems analysis and is given the influence estimation of electromagnetic fields, produced by cellular phones, systems of broadcasting and other radioobjects on ecological security deterioration of cellular systems. It is given the effect of mass population usage of cellular communication means on increase of ecological hazard of location in the town territory of powerful raditelevision transmitting centers and other radioobjects producing high level electromagnetic radiation, establishing intensive electromagnetic fields in places with high density of population. It's proved the necessity of correcting of electromagnetic radiation characteristics normalizing approaches, maximum allowed on ecological reasons, based on probability-statistic normalizing methods of extremely allowable electromagnetic field intensity, which is not exceeded in defined time percent or places percent.

### Литература

1. Попов В. Электромагнитное излучение мобильных телефонов и человеческий организм. Рига, 1999.
2. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М. Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций. Методы защиты, безопасность организма человека. Мн., 2004.
3. Mordachev V.I. // Proc. of the 10<sup>th</sup> International Wroclaw Symposium on EMC. June 26–29, 1990. P. 409–414.
4. Mordachev V. // 15<sup>th</sup> Intern. Wroclaw Symp. And Exhib. on EMC, Poland, Wroclaw, June 27–30, 2000. P. 331–335.
5. Mordachev V. // The IEEE Semi Annual VTC Fall 2000, Boston, Sept. 24–28, 2000, 8 p.
6. Siwiak K. Radiowave propagation and antennas for personal communications. Artech House, 1998, 418 p.
7. Mehrotra A. Cellular Radio: Analog and Digital Systems. Artech House Publishers, Boston–London, 1994, 460 p.
8. Faruque S. Sellular Mobile Systems Engineering. Artech House Publishers, Boston–London, 1996, 292 p.
9. Honcharenko W., Bertoni H.L. Dailing J.L., et al. // IEEE Trans. on Veh. Technol. Vol.41. Nov. 1992. P. 496–504.
10. Feuerstein M.J., Blackard K.L., Rappaport T.S., et al. // IEEE Trans. on Veh. Technol. Vol. 43, Aug. 1994. P. 487–498.
11. Recommendation ITU-R M.1390. Methodology For The Calculation Of IMT-2000 Terrestrial Spectrum Requirements.
12. Report UMTS Forum N6 UMTS/IMT-2000 Spectrum.
13. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ) (Российская Федерация).
14. СанПиН 2.2.4/2.1.8.9-36-2002 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ) (Республика Беларусь).
15. Ott H.W. Noise Prediction Techniques in Electronic Systems. John Wiley & Sons, New York, 1988, 161 p.
16. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М., 1972.

17. *Mordachev V.* // 17<sup>th</sup> International Wroclaw Symposium And Exhibition on EMC, Poland, Wroclaw, June 29–July 1. 2004. P. 55–60.
18. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1971. С. 329, 944.
19. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03 (Российская Федерация).
20. ETSI EN 300 910, V8.5.1 (2001-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999). P. 11.
21. *Mordachev V., Kozel V.* // Proc. Of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility "EMC Europe 2004", Netherlands, Eindhoven, Sept. 6–10, 2004. P. 92–97.
22. *Козел В.М., Мордачев В.И.* // Тр. 15-й Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Украина, 12–16 сентября 2005 г. Севастополь, 2005. С. 310–311.
23. *Сомов А.Ю., Борисова Л.Н., Гольшико А.В.* // Вестник связи. 2004. № 5. С. 46–52.
24. Recommendation ITU-R 370-7. VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz.
25. Recommendation ITU-R 1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range from 30 MHz to 3000 MHz.
26. Резолюция 76 (ВКР-2000). Защита сетей ГСО ФСС и ГСО РСС от максимальной совокупной эквивалентной плотности потока мощности, создаваемой несколькими системами НГСО ФСС в полосах частот, для которых приняты пределы совокупной эквивалентной плотности потока мощности: Сборник рабочих материалов по международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра (3-е изд.). Т. 3. М., 2004. С. Res. 76-1–Res. 76-7.