

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО БЕСПРОВОДНЫМИ СИСТЕМАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ТРАФИКА

В.И. МОРДАЧЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 25 января 2019*

**Аннотация.** Предложена методика оценки уровня электромагнитного фона, создаваемого беспроводными системами информационного обслуживания населения, на основе прогноза суммарной территориальной плотности трафика, определяющей уровень электромагнитной нагрузки на территорию в месте наблюдения, с учетом качества обеспечения внутрисетевой электромагнитной совместимости, спектральной эффективности радиоканалов этих систем и степени развитости их инфраструктуры.

*Ключевые слова:* мобильная связь, электромагнитный фон, плотность мобильного трафика, электромагнитная безопасность, внутрисетевая электромагнитная совместимость.

**Abstract.** A technique for estimating the level of the electromagnetic background created by wireless information services for the population is proposed. This technique is based on the forecast of the total traffic terrestrial density created by these systems, which is connected with the level of electromagnetic loading on territory in observation point vicinity; the quality of intranetwork electromagnetic compatibility, the radiochannels spectral efficiency and degree of development of their infrastructure are also taken into account.

*Keywords:* mobile communications, electromagnetic background, mobile traffic density, electromagnetic safety, intranetwork electromagnetic compatibility.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 39-49**  
**Estimation of intensity of electromagnetic background,**  
**created by wireless systems of public information services,**  
**on the base of forecast of traffic terrestrial density**  
**V.I. Mordachev**

### Введение

Электромагнитное излучение (ЭМИ) является источником опасности для человеческого здоровья [1]. Решением ВОЗ [2] радиочастотные электромагнитные поля (ЭМП) классифицированы в качестве потенциального канцерогенного фактора. Анализ [3] результатов многочисленных измерений электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого источниками ЭМИ различных радиослужб (вещания, подвижной и фиксированной связи, радиолокационной и др.), проведенных в 2000–2011 гг., позволяет сделать выводы о том, что интенсивность ЭМФ в местах с высокой плотностью населения, где проводились измерения, достигала 2–3 мкВт/см<sup>2</sup> и формировалась в основном за счет ЭМИ базовых станций (БС) телефонной сотовой связи (СС), поскольку в указанный период основным видом услуг СС стандарта GSM и других стандартов СС второго поколения (2G) являлись услуги мобильной телефонной связи.

Вынужденные экологические риски населения от воздействия ЭМИ ограничены действующими гигиеническими нормативами, устанавливающими предельно допустимый уровень (ПДУ) суммарной интенсивности ЭМП, создаваемых системами СС и беспроводного доступа для населения. В странах ЕАЭС ПДУ ЭМП составляет  $10 \text{ мкВт/см}^2$ , в других странах и регионах принятые нормативы для населения имеют различный статус и принимают значения в интервале  $2\text{--}100 \text{ мкВт/см}^2$ .

Наблюдаемое в настоящее время чрезвычайно интенсивное развитие систем СС, особенно в части увеличения доли услуг интерактивного вещания и передачи данных, реализации концепций «Интернет вещей», «Умный дом» и т. п., все возрастающего использования беспроводных технологических решений в здравоохранении, образовании, промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и в других сферах человеческой деятельности может быть причиной катастрофического ухудшения электромагнитной экологии среды обитания и недопустимого снижения электромагнитной безопасности населения. Оно сопровождается как значительным увеличением ширины полосы частот радиоканалов – до  $10\text{--}40 \text{ МГц}$  (системы 4G/LTE) и до  $20\text{--}160 \text{ МГц}$  (системы 5G) при их интеграции с сетями WLAN, так и чрезвычайно значительным увеличением скоростей передачи данных по радиоканалам (до  $100 \text{ мбит/с}$  при передаче данных через пользовательский интерфейс и до  $5\text{--}10 \text{ Гбит/с}$  в прямых радиоканалах БС) и пространственной плотности радиоэлектронных средств (РЭС) – источников ЭМИ (до  $10^6$  абонентских станций (АС) на  $1 \text{ км}^2$ ), а также территориальной плотности мобильного трафика до  $10 \text{ Мбит/с/м}^2$  (Rec. ITU-R M.2083, Report ITU-R M.2135), что при традиционных методах планирования и реализации радиосетей СС способно привести к увеличению интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения на 2 порядка и более, т. е. до значений, на порядок и более превышающих принятые гигиенические нормативы.

В связи с изложенным чрезвычайную актуальность приобретает разработка методик практической оценки интенсивности ЭМФ, основанных на использовании доступных исходных данных и обладающих высокой предсказательной способностью по отношению к уровню электромагнитного загрязнения среды обитания и эффективности различных мер снижения интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения в условиях его массового охвата услугами современных и перспективных систем СС.

В работах [4–10] предложена практическая методика оценки уровня ЭМФ, создаваемого системами СС, которая основана на использовании установленной автором однозначной аналитической зависимости средней интенсивности ЭМФ у земной поверхности от средней электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ), создаваемой базовым или абонентским радиооборудованием СС (совокупной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) на единицу площади территории), при практической независимости интенсивности ЭМФ у земной поверхности от высоты подвеса антенн БС, если эта высота существенно превышает высоту точки наблюдения (ТН) над поверхностью. При этом главное слагаемое ЭМНТ – средняя ЭМНТ, создаваемая БС, рассматривается как некая константа, определяемая на основе регистрационных данных об ЭМИ БС, позволяющих определить территориальную плотность БС и их ЭИИМ в анализируемом территориальном фрагменте радиосети. Такой подход может быть признан адекватным при анализе сетей GSM, обладающих ограниченными возможностями адаптации ЭИИМ БС к нагрузке СС в различные периоды, но оказывается менее полезным при анализе сетей 3G/4G/5G, поскольку ряд особенностей этих сетей (регулировка ЭИИМ в прямых и обратных радиоканалах в широком диапазоне, реализация иерархической структуры радиосети СС, использование искусственного интеллекта и т. п.) обеспечивают возможности существенного снижения ЭИИМ БС и создаваемой ими ЭМНТ в ситуациях, когда:

- интенсивность трафика (в том числе в периоды максимальной нагрузки) в сети оказывается меньше ее предельно допустимого уровня;

- по мере развития сети размеры сайтов уменьшаются, что приводит к снижению мощности излучения в радиоканалах по сравнению с потенциально возможными, указываемыми в регистрационных документах;

– наблюдается постоянное увеличение объема и доли услуг передачи данных (по некоторым данным, объем трафика передачи данных по прямым каналам в этих сетях может превышать объем речевого трафика на 2 порядка и более).

Все вышеперечисленное обуславливает снижение объективности оценок интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС поколений 3G/4G/5G, на основе использования регистрационных данных об ЭИИМ БС и данных о территориальной плотности и интенсивности использования сотовых телефонов.

Цель данной работы – обоснование возможности использования методики [4–10] при оценках интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС, на основе прогноза интенсивности и средней территориальной плотности мобильного трафика информационного обслуживания населения по радиоканалам СС, а также использования данных о размерах зон обслуживания БС СС, позволяющих оценить влияние на ЭМНТ, создаваемую совокупностью БС, степени развития инфраструктуры СС и степени приближения радиопередатчиков (БС) к радиоприемникам (АС) с соответствующим уменьшением потерь при распространении радиоволн (РРВ) от БС к АС и снижением необходимой ЭИИМ в радиоканалах БС.

Территориальная плотность трафика (ТПТ), или пропускная способность сети СС по географическому признаку, является важнейшим и широко распространенным объективным интегральным системным параметром беспроводных систем информационного обслуживания населения (Rec. ITU-R M.2083), поэтому его прямое использование для прогноза интенсивности ЭМФ вместо большого объема данных ограниченной доступности и достоверности об ЭИИМ БС способно существенно расширить возможности анализа интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС, и существенно облегчить практический анализ электромагнитной экологии территорий и электромагнитной безопасности населения при различных вариантах реализации радиосетей СС, а также существенно расширить возможности анализа межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) радиослужб, использующих выделенные полосы радиочастот на первичной и вторичной основе, и так называемых систем когнитивного радио.

#### Базовые модели и соотношения [4–12]

В соответствии с теоремой Шеннона – Хартли потенциальная пропускная способность  $C_p$  [бит/с] канала (теоретическая верхняя граница скорости передачи данных по аналоговому каналу связи с аддитивным гауссовским шумом мощности  $N$ ) равна

$$C_p = \Delta F \cdot \log_2(1 + SNR), \quad SNR = S/N, \quad (1)$$

где  $\Delta F$  – полоса пропускания канала, Гц;  $S$  – мощность сигнала в полосе  $\Delta F$ , Вт;  $N$  – мощность шума в полосе  $\Delta F$ , Вт;  $SNR$  – отношение «сигнал/шум» (signal-to-noise ratio) в канале связи.

Для радиоканалов современных систем мобильной (сотовой) связи 2G/3G/4G/5G и беспроводного широкополосного доступа Wi-Fi, WiMAX характерно следующее.

1. Спектральная плотность мощности собственного шума приемника может считаться постоянной  $N_0 \approx N/\Delta F_R$  [Вт/Гц]:

$$N_0 = kT_0 K_N, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $K_N$  – коэффициент шума радиоприемника, ед.;  $T_0$  – температура окружающей среды, град ( $T_0 = 290$  К).

2. Спектр радиосигнала мощностью  $S_R$  близок к прямоугольному, его ширина соответствует ширине  $\Delta F_R$  полосы пропускания радиоканала, а его спектральная плотность мощности  $S_0 \approx S_R/\Delta F_R$  [Вт/Гц] в полосе  $\Delta F_R$  в первом приближении может считаться постоянной.

3. Спектральная плотность мощности внутрисетевых помех  $N_{INT}$ , создаваемых в радиоканалах СС сигналами других БС либо АС, использующих те же рабочие частоты, также может быть принята постоянной.

4. Различием между шириной  $\Delta F_N$  шумовой полосы частот канала и шириной его стандартной полосы частот  $\Delta F_R$  можно пренебречь:  $\Delta F_N \approx \Delta F_R$ .

5. Выражение для потенциальной пропускной способности радиоканала может быть приведено к следующему виду:

$$C_{PR} \approx \Delta F_R \cdot \log_2(1 + CNIR), \quad CNIR = S_0 / (N_0 + N_{INT}), \quad S_{EP} = C_{PR} / \Delta F_R \approx \log_2(1 + CNIR), \quad (3)$$

где  $S_{EP}$  [бит/с/Гц] – потенциальная спектральная эффективность передачи информации в радиоканале,  $CNIR$  – отношение «сигнал/(шум+внутрисистемная помеха)» («carrier-to-noise plus intrasystem interference» ratio).

6. Реальная скорость  $C_{RR}$  передачи информации в канале связи в  $m$  раз меньше потенциальной пропускной способности канала  $C_{PR}$ ; во столько же раз реальная спектральная эффективность  $S_{ER}$  передачи информации в канале меньше потенциальной:

$$C_{PR} = mC_{RR}, \quad S_{ER} = S_{EP} / m. \quad (4)$$

7. Множитель  $m$  в (4) отражает как соотношение потенциальной и реально достижимой спектральной эффективности радиоканала, так и вклад технологии ММО в повышение спектральной эффективности передачи информации по радиоканалу. В радиоканалах СС без использования технологии ММО  $m \approx 2...10$ . Таким образом, планируемое увеличение спектральной эффективности в радиоканалах LTE за счет технологии ММО в 2–8 раз фактически позволяет лишь скомпенсировать неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования. Поэтому дальнейший анализ будет выполнен для  $m = 1$  в предположении, что скорость передачи данных  $C$  в радиоканалах СС близка к потенциальной в определении (1):  $C \approx C_{PR}$ .

8. Минимальная мощность полезного сигнала  $P_{DSIN}$  в радиоканале (реальная чувствительность радиоприема), при которой обеспечивается пропускная способность  $C_{PR}$  радиоканала с тепловым шумом мощностью  $N$  и внутрисетевой помехой мощностью  $P_{INT} = N \cdot K_{CC}$  (пренебрегая различиями влияния внутрисетевой помехи и теплового шума на пропускную способность радиоканала), определяется соотношением

$$P_{DSIN} = N_{\Sigma} \Delta F_R (2^{S_{EP}} - 1), \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) k T_0 K_N, \quad S_0 / N_{\Sigma} = CNIR, \quad (5)$$

где коэффициент  $K_{CC} \approx N_{INT} / N_0$  характеризует создаваемое превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума; его величина определяется качеством частотно-пространственного планирования (ЧПП) радиосети и может принимать значения в широких пределах от 0 (внутрисетевая помеха отсутствует) до 100...1000 и даже более (при низком качестве ЧПП; при функционировании СС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при кластерной пространственной топологии СС является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи).

### Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая излучением базовых станций

При мощности полезного сигнала  $P_{DSIN}$  на входе радиоприемника минимально необходимая энергия сигнала для приема информации со скоростью  $C_{PR}$  [бит/с] в течение времени  $t$  равна  $E_{DSIN}(t) = P_{DSIN} \cdot t$ , и энергия, приходящаяся на 1 бит принятой информации объемом  $C_{\Sigma}(t) = t \cdot C_{PR}$ , должна быть не ниже следующего значения:

$$E_b = \frac{E_{DSIN}(t)}{C_{\Sigma}(t)} = \frac{\Delta F_R N_{\Sigma} (2^{S_{EP}} - 1)}{S_{EP} \Delta F_R} = \frac{(K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}{S_{EP}}. \quad (6)$$

Для того, чтобы сигнал на входе приемника имел энергетику (6) и в СС обеспечивался хендовер – процесс передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной БС к другой без нарушения и потери обслуживания при пересечении АС границы сайтов, необходимо следующее:

– радиосигналы должны излучаться передатчиками БС с энергией, компенсирующей базовые потери  $L_b$  при распространении радиоволн (РРВ) от антенны передатчика БС к антенне приемника АС (Rec.ITU-R P.341); применительно к рассматриваемому случаю ограничимся учетом потерь  $L_{bf}$  при РРВ в свободном пространстве (поскольку на густонаселенной

городской территории радиус микросайтов сотовой сети, как правило, меньше радиуса области свободного РРВ («breakpoint distance», Rec.ITU-R P.1411-8), определяемого с учетом отражения ЭМИ БС от земной поверхности и стен зданий) и учетом потерь на затухание радиоволн в зданиях при обслуживании АС внутри помещений. Величина усредненных потерь  $L_m$  на затухание радиоволн в зданиях зависит от диапазона частот, а также этажа, особенностей архитектуры, материала здания и других факторов и составляет в среднем 12–18 дБ (Report ITU-R 239, Report ITU-R 499 и др.). Потери на замирания  $L_C$  при РРВ в «каньонах» городской застройки связаны с многолучевостью и дифракцией; они зависят от высоты и плотности городской застройки, высоты подвеса антенн БС, высоты и характера пространственного размещения АС и т. п. и могут составлять 10–20 дБ. Но, принимая во внимание требования к качеству связи, в модели условий РРВ Rec.ITU-R P.1411-8 для этих условий корректирующий множитель на замирания принят равным 20 дБ;

– энергия сигналов на входе приемника АС должна превышать минимально необходимый уровень на некоторую величину  $K_H$ , обеспечивающую необходимый запас по уровню принимаемого сигнала АС для реализации хендвера;

– эквивалентная изотропно излучаемая энергия (ЭИИЭ) на бит передаваемой информации должна быть обеспечена на уровне не ниже  $E_{bt} = E_b L_{bf} L_m L_C K_H$ .

Затухание при РРВ в свободном пространстве определяется следующей формулой (Rec. ITU-R PN.525):

$$L_{bf} = \frac{E_{bt}}{E_b} = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 [\text{единиц}]. \quad (7)$$

Отсюда

$$E_{bt}(R) = L_{bf} L_m K_H E_b = K_1 R^2, \quad K_1 = \frac{16\pi^2 k T_0 K_N L_m L_C K_H (2^{m_{SEK}} - 1)(K_{CC} + 1)}{\lambda^2 S_{ER}}. \quad (8)$$

Плотность распределения вероятности расстояний между передатчиком (антенной БС) и приемником (АС) при случайном равномерном распределении АС по плоской земной поверхности имеет следующий вид [12]:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}, \quad H = H_{BS} - h \approx H_{BS} \ll R_{\max}; \quad H \leq R \leq R_{\max}, \quad (9)$$

где  $H_{BS}$  – высота подвеса антенны БС ( $H_{BS} \geq 10$  м),  $h$  – высота АС над поверхностью (обычно принимается равной в пределах 1–2 м, т. е. с учетом расположения АС у тела человека в положении «стоя» или «сидя»);  $R_{\max}$  – радиус зоны обслуживания, на границе которой обслуживание АС с мощностью полезного сигнала не ниже (5) требует максимальной ЭИИЭ БС на бит передаваемой информации.

Поскольку расстояние между приемником и передатчиком в системах СС случайно, случайным оказывается и величина потерь при РРВ между БС и АС. И вследствие того, что в прямых каналах связи (БС-АС) третьего (3G) и последующих поколений имеет место адаптация по мощности ЭМИ БС, обеспечивающая номинальный (минимально необходимый) уровень сигнала на входе приемника АС, значения (8) также являются случайными. Используя (8), (9), определим распределение вероятности ЭИИЭ БС мобильной связи, приходящейся на 1 бит передаваемой информации:

$$w(E_{bt}) = w(R(E_{bt})) \left| \frac{dR(E_{bt})}{dE_{bt}} \right| = \frac{1}{E_{bt\max} - E_{bt\min}} \approx \frac{1}{E_{bt\max}}; \quad (10)$$

$$m_1(E_{bt}) \approx \frac{E_{bt\max}}{2} = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m_{SEK}} - 1)(K_{CC} + 1) R_{\max}^2}{\lambda^2 S_{ER}}. \quad (11)$$

Таким образом, плотность распределения вероятности ЭИИЭ на бит передаваемой информации имеет вид равномерного распределения с матожиданием, равным половине от максимального значения, соответствующего расположению принимающей АС на границе сайта.

При равномерном случайном распределении АС в активном состоянии по территории со средней плотностью  $\rho$  [АС/м<sup>2</sup>], если каждая АС принимает поток со скоростью  $V$  [бит/с], то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения

по прямым каналам БС будет равна  $S_{tr} = \rho V$  [бит/(с·м<sup>2</sup>)], и создаваемая БС СС средняя ЭМНТ  $B$  [Вт/м<sup>2</sup>] составит

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, S_{EP}, \lambda) = m_1(E_{bt}) S_{tr} = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m_{SE}} - 1) (K_{CC} + 1) R_{\max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 S_{ER}}, \quad (12)$$

где  $Q = P_{AR}/P_{AI} < 1$  – системный параметр направленности ЭМИ БС (направленности ЭМИ битов передаваемой информации), определяемый по аналогии с [13,14]; здесь  $P_{AR}$  и  $P_{AI}$  – значения мощности ЭМИ БС, достигающей области наблюдения вблизи земной поверхности, для случая реальной антенны БС с избирательностью по горизонтали и вертикали и для случая идеальной всенаправленной (изотропной) антенны БС с тем же коэффициентом усиления соответственно. Это соотношение получено при условии, что на входе радиоприемника АС присутствует сигнал минимально необходимого уровня, соответствующего необходимому значению  $CNIR$ , и структура радиосети регулярна с  $N_S$  секторами на каждой БС;  $Q \approx 1/N_S$ .

Подстановкой (12) в предложенную в [4, 6–10] формулу для пессимистической оценки (оценки наихудшего случая) средней суммарной интенсивности ЭМФ  $Z_{\Sigma BS}$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемого в ТН у земной поверхности на высоте  $H_{OP} \ll H_{BS}$  всем множеством БС СС, расположенных случайно по отношению к ТН в ее окрестности, включающей как зону свободного РРВ между БС и ТН, так и область интерференционного РРВ между ними, получим следующее соотношение для оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого БС сети сотовой связи, функционирующей в полосе частот, соответствующей длине волны  $\lambda$ :

$$Z_{BS} \approx \frac{B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, S_{EP}, \lambda)}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP} \sqrt{e}}{\lambda} \right), \quad Z_{BS} = \sum_{i=1}^N |\Pi_{BSi}|. \quad (13)$$

Оценки (8), (11), (12), (13) существенно зависят от длины волны  $\lambda$ . Принимая во внимание относительную узость полос частот, выделенных для ЭМИ БС мобильной связи (отношение ширины выделенной полосы частот к значению ее левой границы составляет 2,7 % для GSM-900, 4,2 % для GSM-1800, 2,8 % для UMTS, менее 5 % для каждой из полос частот LTE [37]), эти оценки для каждой полосы частот можно выполнять для фиксированного значения  $\lambda$ , соответствующего ее середине. Поскольку для каждой полосы частот может быть характерен свой стандарт СС, а также свои значения  $K_{CC}$ ,  $S_{EP}$ ,  $S_{tr}$ ,  $R_{\max}$ , суммарная интенсивность ЭМФ, создаваемого всеми  $J$  подмножествами БС СС, отличающимися используемой полосой частот, иерархическим уровнем в структуре радиосети СС и другой спецификой, может быть определена очевидным образом:

$$Z_{\Sigma BS} = \sum_{j=1}^J \frac{B_j(R_{\max j}, S_{tr j}, K_{CC j}, S_{EP j}, \lambda_j)}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP} \sqrt{e}}{\lambda_j} \right), \quad (14)$$

где  $Z_{\Sigma BS}$  – суммарная интенсивность ЭМФ [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемого в ТН на высоте  $H_{OP}$  над земной поверхностью, определяемая как скалярная сумма значений плотности потока мощности  $\Pi_{BSi}$  ЭМП в ТН от всех БС в области их радиозаметности из ТН.

### Оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого ЭМИ БС

Для оценки практической применимости приведенных соотношений ниже выполнен сравнительный анализ результатов оценки суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого БС СС стандарта GSM-1800 в типовых условиях, на основе непосредственного применения подхода [4–10] и с использованием соотношений (8), (11)–(13).

Оценки средней территориальной плотности трафика при различной интенсивности беспроводного информационного обслуживания населения приведены в таблице.

При выполнении анализа приняты следующие типовые условия: диапазон частот телефонной СС 1,8 ГГц ( $\lambda \approx 0,16$  м); территориальная плотность АС в активном состоянии  $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$  АС/м<sup>2</sup> ( $M_{SS} = 500$  АС/км<sup>2</sup> при территориальной плотности всех АС 5000–6000 АС/км<sup>2</sup> и удельной интенсивности трафика в периоды наибольшей нагрузки 0,08–0,1 Эрл.), скорость передачи данных по каналу речевого трафика GSM  $V = 2^{15}$  бит/с, один радиоканал GSM обеспечивает передачу 8 каналов речевого трафика; антенна АС ненаправленная

с коэффициентом усиления, близким к 1 (0 дБ); все БС регулярной одноуровневой радиосети GSM имеют трехсекторную структуру ( $Q \approx 1/3$ ) с четырьмя радиоканалами в каждом секторе (30 каналов трафика и 2 канала управления) с суммарной ЭИИМ  $P_{EBS} = 800$  Вт (59 дБм) при часто используемой канальной ЭИИМ 53 дБм (200 Вт).

#### Оценки средней территориальной плотности трафика по прямому каналу БС в различных условиях

Характеристика обслуживаемой территории и услуг связи перспективных СС	$V$ , бит/с	$\rho$ , АС/м <sup>2</sup> (АС/км <sup>2</sup> )	$S_{tr}$ , бит/(с·м <sup>2</sup> )
Речевой трафик GSM, высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$3,3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-3}$ ( $3 \cdot 10^3$ )	$10^1 \dots 10^2$ (очень низкая)
Речевой трафик GSM, очень высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$3,3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-2}$ ( $3 \cdot 10^4$ )	$10^3$ (низкая)
Совокупный мобильный трафик, высокая территориальная плотность потребителей услуг связи	$4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^{-3}$ ( $2,5 \cdot 10^3$ )	$10^4$ (средняя)
Планируемый объем услуг в сетях 4G, высокая территориальная плотность потребителей <sup>1)</sup>	$10^7$	$10^{-2}$ ( $10^4$ )	$10^5$ (высокая)
Планируемый объем услуг в сетях 5G, высокая территориальная плотность потребителей <sup>1)</sup>	$10^7$	$10^{-1}$ ( $10^5$ )	$10^6$ (очень высокая)
Планируемый объем услуг в сетях 5G, очень высокая территориальная плотность потребителей <sup>1)</sup>	$10^8$	$1$ ( $10^6$ )	$10^7$ (чрезвычайно высокая)

<sup>1)</sup> Рес. ИТУ-R М.2083

#### Оценка интенсивности ЭМФ на основе подхода [4–10]

При принятой структуре БС (3 сектора, в каждом секторе 4 радиоканала, что обеспечивает 30 каналов трафика и 2 канала управления) общее число каналов трафика, реализуемых каждой БС, равно 90. Однако для обеспечения высокого качества связи (с вероятностью блокирования вызова не более 1 %) в каждом секторе БС в среднем должно одновременно обслуживаться не более 20 АС (в среднем не более  $M_{SSS} = 60$  обслуживаемых АС в сайте БС) [15]. При излучении в каждом секторе БС 32 канальных слотов ЭМИ БС в периоды максимальной нагрузки осуществляется с избыточностью в ЭИИМ (в 1,6 раз). В результате:

– средняя территориальная плотность БС:  $\rho_{BS} = M_{SS}/M_{SSS} \approx 8,3$  БС/км<sup>2</sup>, площадь круга, покрывающего гексагональную зону обслуживания БС, равна примерно 0,12 км<sup>2</sup>, и его радиус  $R_{max}$ , соответствующий максимальной дальности радиосвязи, составляет примерно 200 м;

– при суммарной ЭИИМ БС 800 Вт средняя ЭМНТ, создаваемая всем множеством БС СС на рассматриваемой местности, составляет  $B_1 = \rho_{BS} P_{EBS} = 8,3 \cdot 0,8 \approx 6,7$  кВт/км<sup>2</sup> = 0,0067 Вт/м<sup>2</sup>;

– такая ЭМНТ, согласно (13), на высоте  $H_{OP} = 2$  м над земной поверхностью создает ЭМФ со средней интенсивностью

$$Z_{BS1} \approx \frac{0,0067}{2} \ln \left( \frac{4 \cdot 2 \sqrt{e}}{0,16} \right) \approx 0,0148 \text{ Вт/м}^2.$$

#### Дополнительная информация для реализации сравнительного анализа

Для анализа интенсивности ЭМФ с использованием (8), (11)–(13) следует принять во внимание следующее:

– пороговая чувствительность радиоприема АС GSM-1800 составляет –105 дБм [16]. Это согласуется с оценками с использованием (5): при  $K_N = 5$ ,  $\Delta F = 200$  кГц,  $T_0 = 290$  К получим  $P_{DSIN} = k T_0 K_N \Delta F = 4 \cdot 10^{-15}$  Вт или –144 дБВт = –114 дБм; при пороговом значении  $CNIR = 2^{m_{Ser}} - 1 = 8$  (или 9 дБ) пороговая чувствительность радиоприема будет равна  $P_0 = P_{DSIN} + CNIR = -105$  дБм;

– в соответствии с (7) потери на РРВ в свободном пространстве на максимальное расстояние 200 м равны примерно 84 дБ, однако в связи со случайностью расстояния между БС и АС, принимая во внимание распределение вероятностей (9) и зависимость (7), можно найти плотность распределения вероятностей и матожидание потерь РРВ в свободном пространстве:

$$w(L_{bf}) = w(R(L_{bf})) \left| \frac{dR(L_{bf})}{dL_{bf}} \right| = \frac{1}{L_{bf \max} - L_{bf \min}} \approx \frac{1}{L_{bf \max}}; \quad (15)$$

$$m_1(L_{bf}) \approx \frac{L_{bf \max}}{2} = \frac{8\pi^2 R_{\max}^2}{\lambda^2}; \quad (16)$$

при  $R_{\max} = 200$  м,  $\lambda = 0,16$  м мы получим  $m_1(L_{bf}) \approx 81$  дБ;

– при  $P_0 = -105$  дБм минимально необходимая ЭИИМ одного радиоканала БС составляет в среднем  $(-105 + 81) = -24$  дБм (4 мВт). При принятой ЭИИМ 53 дБм одного радиоканала GSM-1800 в рассматриваемом типовом случае получен запас на замирания, затухания в зданиях, хендовер и внутрисетевые помехи  $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1) = 77$  дБ.

### Оценка интенсивности ЭМФ на основе анализа ТПТ

При скорости передачи данных от БС к АС  $V = 2^{15}$  бит/с и средней территориальной плотности АС  $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$  АС/м<sup>2</sup> средняя ТПТ будет равна  $S_{tr} = \rho V \approx 16,4$  бит/с/м<sup>2</sup>.

Производя расчет с использованием (6) для  $K_{CC} = 0$  (внутрисетевая помеха отсутствует),  $S_{ER} = 1,31$ ,  $m = 2,42$  [11, 17] (при  $CNIR = 9$  дБ в соответствии с (3)  $S_{EP} = 3,17$ ), мы получим пороговый уровень энергии на бит принимаемой АС информации:

$$E_b = \frac{(K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{m S_{ER}} - 1)}{S_{ER}} \approx 1,22 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

*Проверка:* при скорости передачи информации в радиоканале  $C = 2^{18}$  бит/с реальная чувствительность радиоприема АС будет равна  $P_{DSIN} = C \cdot E_b = 3,2 \cdot 10^{-14}$  Вт, или  $-104,9$  дБм, что совпадает с [16].

Оценивая с использованием (12) среднюю ЭМНТ  $B_{II}$ , создаваемую БС, при  $S_{tr} \approx 16,4$  бит/с/м<sup>2</sup>,  $Q = 1/3$  и  $E_b \approx 1,22 \cdot 10^{-19}$  Дж, а также при том же значении резерва  $K_T = 5 \cdot 10^7$  на замирания, затухания в зданиях, хендовер и внутрисетевые помехи, мы получаем  $B \approx 0,0041$ . Введение той же избыточности ЭИИМ БС в 1,6 раз, необходимой для обеспечения высокого качества связи с вероятностью блокирования вызовов  $\leq 1\%$ , получим  $B_{II} = 1,6B \approx 0,0066$ . Такая ЭМНТ в соответствии с (13) на той же высоте  $H_{OP} = 2$  м над земной поверхностью создает ЭМФ со средней интенсивностью

$$Z_{BSII} \approx \frac{0,0041}{2} \ln \left( \frac{4 \cdot 2\sqrt{e}}{0,16} \right) \approx 0,0146 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, полученная оценка  $Z_{BSII}$  практически совпадает с оценкой  $Z_{BSI}$  интенсивности ЭМФ на основе подхода [4–10].

### Влияние внутрисистемной ЭМС на интенсивность ЭМФ

В рассмотренном выше типовом примере оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого БС с ЭИИМ 53 дБм, выявлен резерв в ЭИИМ БС  $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1) = 77$  дБ. Неустраняемая часть  $K_H L_m L_C$  этого резерва, необходимая для обеспечения хендовера, компенсации замираний и потерь при РРВ внутрь зданий, составляет 30–50 дБ. Таким образом, при ЭИИМ БС 47–57 дБм, обычно используемой в городских сетях GSM, оставшаяся часть резерва ( $K_{CC} + 1$ ) составляет не менее 20–30 дБ. В соотношениях (5)–(14) коэффициент  $K_{CC}$  представляет собой отношение уровней внутрисетевой помехи и собственного теплового шума при радиоприеме АС и характеризует качество обеспечения внутрисистемной (внутрисетевой) ЭМС; при низком уровне внутрисетевой ЭМС  $K_{CC} \gg 10$ .

Ниже на рис. 1–4 приведены результаты анализа интенсивности ЭМФ (13), создаваемого БС у земной поверхности при различных относительных уровнях внутрисетевых помех в каналах СС, выполненного для следующих условий, принятых в качестве типовых: территориальная плотность АС в активном состоянии  $\rho = 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$  АС/км<sup>2</sup> ( $10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$  АС/м<sup>2</sup>), полоса частот СС в области 2 ГГц ( $\lambda = 0,15$  м); умеренный резерв  $K_H L_m L_C = 30$  дБ в ЭИИМ БС на реализацию хендовера, компенсацию замираний и потерь при РРВ внутрь зданий; трехсекторная структура регулярной радиосети СС ( $N_S = 3$ ,  $Q = 1/3$ ),  $K_N = 5$ ,  $T_0 = 290$  К.

На рис. 1 для средней ТПТ  $S_{tr} = 3 \cdot 10^4$  бит/с/м<sup>2</sup> и  $Q = 1/3$  приведены расчетные зависимости  $Z_{BS}(R_{\max})$  средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС, от максимальной



дальности связи (радиуса окружности, описывающей зону обслуживания БС). Расчетные зависимости  $Z_{BS}(QS_{tr})$  средней условной интенсивности ЭМФ от ТПТ, полученные для максимальной дальности связи 300 и 100 м, приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

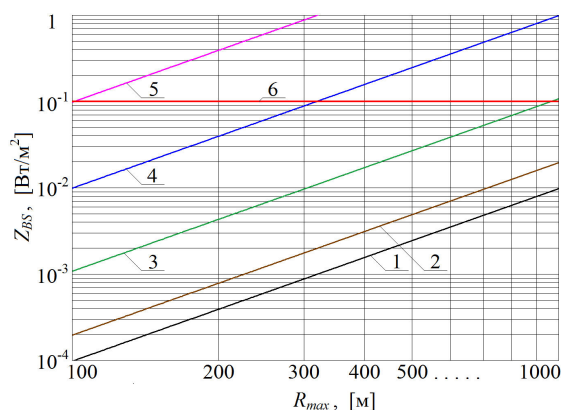


Рис. 1. Зависимости  $Z_{BS}(R_{max})$ , полученные для  $S_{tr}=3 \cdot 10^4$  бит/(с·м<sup>2</sup>) и различных  $K_{CC}$  при  $Q = 1/3$ ,  $S_{EP}=5$ ,  $K_N=5$ ,  $T_0=290$  К,  $\lambda = 0,15$  м,  $K_H L_m L_C=1000$

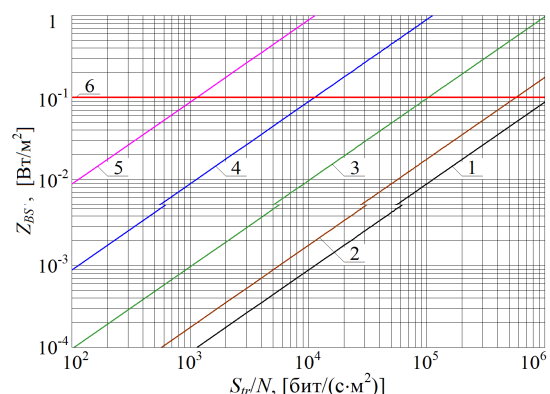


Рис. 2. Зависимости  $Z_{BS}(QS_{tr})$ , полученные для  $R_{max} = 300$  м и различных  $K_{CC}$  при  $Q = 1/3$ ,  $S_{EP}=5$ ,  $K_N=5$ ,  $T_0=290$  К,  $\lambda = 0,15$  м,  $K_H L_m L_C=1000$

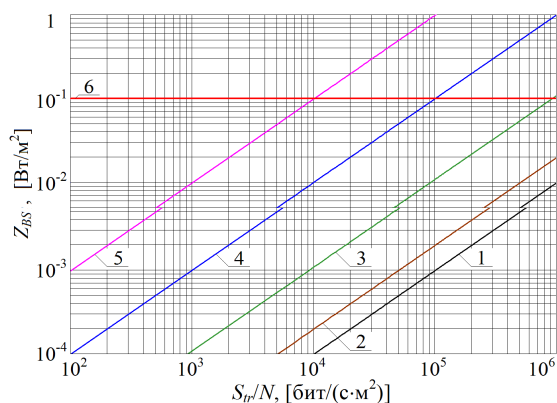


Рис. 3. Зависимости  $Z_{BS}(QS_{tr})$ , полученные для  $R_{max} = 100$  м и различных  $K_{CC}$  при  $Q = 1/3$ ,  $S_{EP}=5$ ,  $K_N=5$ ,  $T_0=290$  К,  $\lambda = 0,15$  м,  $K_H L_m L_C=1000$

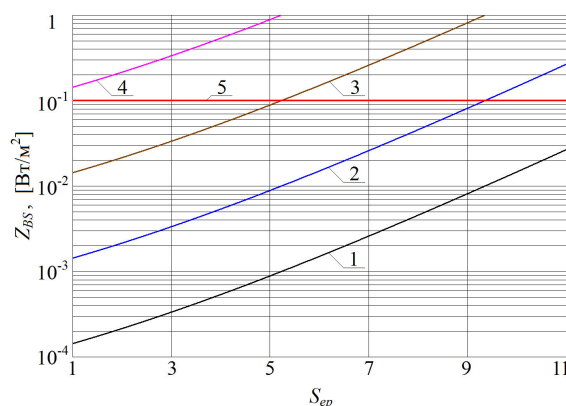


Рис. 4. Зависимости  $Z_{BS}(S_{EP})$ , полученные для  $R_{max} = 300$  м,  $\lambda = 0,15$  м и различных значений  $QS_{tr}$  при  $K_N=5$ ,  $T_0=290$  К,  $K_{CC}=100$ ,  $K_H L_m L_C=1000$

Данные зависимости рассчитаны для различных значений  $K_{CC}$  при  $S_{EP}=5$ . Графики № 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям  $K_{CC}=0, 1, 10, 10^2, 10^3$  соответственно; горизонтальная линия № 6  $Z_{BS}(R_{max})=0,1$  Вт/м<sup>2</sup> и  $Z_{BS}(QS_{tr})=0,1$  Вт/м<sup>2</sup> соответствует принятому ПДУ ЭМФ. Сравнение этих зависимостей для различных  $K_{CC}$  позволяет сделать вывод о чрезвычайно существенном влиянии качества частотно-пространственного планирования и обеспечения внутрисетевой ЭМС СС новых поколений на их безопасность для населения. В частности:

- при  $S_{tr} = 3 \cdot 10^4$  бит/с·м<sup>2</sup>,  $Q = 1/3$  и высоких уровнях внутрисетевых помех ( $K_{CC} \geq 10^2$ ) безопасность СС для населения даже при умеренном необходимом запасе в ЭИИМ БС  $K_H L_m L_C = 30$  дБ обеспечивается только при использовании микро-сайтов с территориальной плотностью БС порядка 15–20 БС/км<sup>2</sup> и более;

- при малой ТПТ обеспечение электромагнитной безопасности населения не представляет сложностей, однако при ожидаемом быстром росте интенсивности этого трафика обеспечение безопасности населения потребует существенного снижения внутрисетевых помех, в том числе за счет существенного расширения объема радиочастотного спектра, выделяемого СС новых поколений.

Данные выводы подтверждаются и анализом расчетных зависимостей средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС, от потенциальной спектральной эффективности (рис. 4) для различных уровней средней плотности трафика (кривые 1, 2, 3, 4 получены для значений  $QS_{tr} = 10^2, 10^3, 10^4$  и  $10^5$  бит/с·м<sup>2</sup> соответственно, горизонтальная линия 5 соответствует ПДУ

ЭМФ). Прямое увеличение потенциальной спектральной эффективности радиоканалов СС, достигаемое за счет увеличения  $CNIR$  и соответствующего роста канальной ЭИИМ БС, также влечет рост уровня внутрисетевых помех и, как следствие, увеличение уровней ЭМФ у земной поверхности. Однако применение технологии ММО и адаптивных антенн БС в перспективе способно изменить эту зависимость на противоположную.

Из (11)–(14) следует, что с уменьшением длины волны требования к снижению относительного уровня внутрисетевых помех и к качеству внутрисистемной ЭМС ужесточаются, однако их выполнение не должно вызывать принципиальных трудностей в связи с увеличением направленности и адаптивности ЭМИ БС 4G/5G и степени экранирования ЭМИ БС элементами городской застройки, рельефа земной поверхности и растительности, а также в связи с существенным расширением объема радиочастотного спектра, выделяемого СС новых поколений.

### Заключение

Полученные соотношения (12)–(14) обеспечивают возможность использования разработанной автором методики [4–10] оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого радиосетями СС на обслуживаемой территории, непосредственно на основе прогноза средней территориальной плотности беспроводного трафика информационного обслуживания населения в периоды наибольшей нагрузки и данных о размерах сайтов в рассматриваемом фрагменте радиосети СС, не прибегая к сложному и трудоемкому анализу радиоэлектронной обстановки и оценке ЭМНТ, создаваемой всей совокупностью БС беспроводных систем информационного обслуживания населения – сотовой (мобильной) связи, беспроводного широкополосного доступа и др.

Поскольку оценки интенсивности ЭМФ по данной методике хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [3], следует ожидать и хорошего соответствия оценок интенсивности ЭМФ на основе прогноза ТПТ результатам физических измерений интенсивности ЭМФ в местах с высокой плотностью населения; тем не менее экспериментальная проверка предложенной методики представляет безусловный интерес.

Выражения (12)–(14) позволяют количественно оценить эффективность различных путей снижения интенсивности ЭМФ за счет уменьшения избыточности в ЭИИМ БС  $K_T = K_H L_m L_C (K_{CC} + 1)$  для обеспечения хендвера, компенсации замираний и потерь при РРВ внутрь зданий, компенсации неидеальности внутрисетевой ЭМС, а также за счет повышения избирательности ЭМИ БС уменьшением значения системного параметра  $Q$  направленности ЭМИ БС.

Предложенная методика оценки ожидаемой интенсивности ЭМФ на основе прогноза ТПТ существенно облегчает как процедуры анализа электромагнитной экологии густонаселенных территорий и электромагнитной безопасности населения в условиях чрезвычайно интенсивного развития беспроводных технологий и СС новых поколений, так и процедуры анализа ЭМС радиосистем радиослужб, использующих радиочастотный спектр на первичной и вторичной основе.

### Список литературы / References

1. Apolonski S.M., Koliada T.D., Sindalovski B.E. Safety of vital activity in electromagnetic fields. Spb: Polytechnika, 2006. 263 p. (in Russ.)
2. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans // WHO, Press Release. 2011. No. 208.
3. Mordachev V.I. Verification of the worst case model for the estimation of average intensity of the electromagnetic background created by base stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2018. No. 1. P. 12–18 (in Russ.)
4. Mordachev V.I. Terrestrial electromagnetic loading created by electromagnetic radiations of cellular base stations // Doklady BGUIR. 2012. № 6. P. 116–123. (in Russ.)
5. Mordachev V.I. Electromagnetic filling on the territory, created by user's stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2012. No.7. P. 25–33. (in Russ.)
6. Mordachev V.I. Terrestrial electromagnetic filling in nonhomogeneous radio-electronic environment // Doklady BGUIR. 2012. No.8. P. 23–31. (in Russ.)

7. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations // Proc. of the 9th Intern. Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC 2013). Cagliari, Sardinia, Italy, July 1–5, 2013. P. 590–595.
8. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, Germany, August 16–22, 2015. P. 1147–1152.
9. Mordachev V.I. Electromagnetic background created by base and mobile radio stations of cellular communications // Doklady BGUIR. 2016. No.1. P. 38–44. (in Russ.)
10. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications // Proc. of the 2016 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2016». Wroclaw, Poland, September 5–9, 2016. P. 590–595.
11. Mordachev V.I. Electromagnetic safety of broadband systems of mobile communications of new generations // Doklady BGUIR. 2018. No. 3. P. 39–46.
12. Mordachev V. System ecology of cellular communications. Minsk: Belarus State University Publishers, 2009. 319 p. (in Russ.)
13. Loyka S.L., Mordachev V.I. Generalized System Characteristic of Antenna Selectivity // Proc. of International Conference on Electromagnetic Compatibility (ICEMC'95 KUL). Kuala Lumpur, Malaysia, 1995. P. 41–45.
14. Mordachev V.I. Generalized EMC characteristics of radio equipment // Proc. of the Intern. conference on metrology and measurement «ICMM 2007». Vol. 2. Beijing, September 5–7, 2007. P. 57–66.
15. Mehrotra A. Cellular radio: analog and digital systems. Artech House, 1994. 423 p.
16. 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).
17. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates // Proc. of the 2018 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility «EMC Europe 2018». Amsterdam, August 27–30, 2018. P. 202–207.

#### **Сведения об авторе**

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

#### **Information about the author**

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leading researcher of 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;  
www.emc.bsuir.by  
Мордачев Владимир Иванович

#### **Address for correspondence**

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