

Анализ методики расчета уровней сигналов мобильной связи в условиях города

*М.А. Джабборова (ГУП «UNICON.UZ»), Д.Н. Ликонцев, Х.Х. Мадаминов (ТУИТ),
А.Н. Ликонцев (СПбГУТ)*

Для определения возможности работы мобильной радиосвязи, беспроводного интернета и цифрового телевидения внутри помещений необходимо знать уровни поля (или уровня сигнала на входе мобильного терминала) вне помещений. Также для оптимального размещения базовых станций мобильной связи весьма важно знать распределение поля в городских условиях. Для этих целей используются различные методики расчета уровней поля в условиях города, приведенные ниже.

Один из доступных способов - использование методик расчета с эмпирическими коэффициентами, которые получены на основе усреднения большого объема экспериментальных данных. Каждая методика имеет собственный набор эмпирических коэффициентов, а также свои условия применимости. Детерминистские методики, также используемые для расчета, основаны на принципе геометрической оптики и геометрической теории дифракции и учитывают реальную городскую застройку. Такие методики можно использовать как для расчета стационарной линии связи, так и для расчета уровней поля базовых станций мобильной связи, особенно на частотах выше одного ГГц.

Важное место среди первых публикаций по расчету напряженности поля в городе занимает работа Бардина Н.И. и Дымовича Н.Д., в которой сделана попытка теоретически обобщить полученные экспериментальные результаты в городских условиях.

В общем случае можно написать

$$\begin{aligned} P_c &= P_0 - L_{\Sigma}, \text{ дБ} \\ \text{или} \quad E &= E_0 - L_{\Sigma}, \text{ дБ}, \end{aligned}$$

где: P_c - значение мощности на входе мобильного терминала, дБм;

P_0 - значение мощности на входе мобильного терминала в свободном пространстве, дБм;

E - значение напряженности поля, дБ;

E_0 - значение напряженности поля в свободном пространстве, дБ;

L_{Σ} - величина потерь передачи, дБ.

Часть методик расчета приведена в [1]. В тексте статьи использованы следующие обозначения: f - частота; λ - длина волны, м; r - расстояние; V - множитель ослабления.

В работе Окамуры

$$\begin{aligned} L_{\Sigma} &= L_{\Gamma,0}(r, f) - \Delta h_{\text{баз.ст}}(h_{\text{баз.ст}}, r) - \Delta h_{\text{моб.т}}(h_{\text{моб.т}}, f) - \\ &- \Delta K_{\text{п.о.м}} - \Delta K_{\text{х.м}} - \Delta K_{\text{г.м}} - \Delta K_{\text{с.м.с}}, \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (1)$$

где: $L_{\Gamma,0}(r, f)$ - величина ослабления в городе относительно свободного пространства, дБ, определяемое из вспомогательного графика;

$\Delta h_{\text{баз.ст}}(h_{\text{баз.ст}}, r)$ - поправка на высоту подвеса антенны базовой станции, дБ, определяемая из вспомогательного графика;

$\Delta h_{\text{моб.ст}}(h_{\text{моб.ст}}, f)$ - поправка на высоту подвеса антенны мобильного терминала, дБ, определяемая из вспомогательного графика;

$\Delta K_{\text{п.о.м}}$ - поправочный коэффициент для пригородной и открытой местности, дБ, определяемый из вспомогательного графика;

$\Delta K_{x.m}$ – поправочный коэффициент для холмистой местности, дБ, определяемый из вспомогательного графика;

$\Delta K_{г.м}$ – поправочный коэффициент для гористой местности, дБ, определяемый из вспомогательного графика;

$\Delta K_{с.м.с}$ – поправочный коэффициент для местности типа "суша-море-суша", дБ, определяемый из вспомогательного графика.

Реудинк предложил рассчитывать величину потерь передачи для расчета мощности на входе приемного устройства P_c по формуле, аналогичной формуле (1).

Хата предложил формулы для расчета величины потерь передачи L_p в городской и пригородной зонах (формулы рекомендованы МСЭ) в диапазоне частот 150-1500 МГц для высот подвеса антенн базовой станции $h_{баз.ст} = 30 - 200$ м, высот антенн подвижного терминала $h_{моб.т} = 1-10$ м и расстояний $r = 1-20$ км. Уравнения основаны на упрощенных эмпирических зависимостях Окамуры. Однако методики Хата дают завышенное значение ослабления.

Развитие мобильных систем связи привело к появлению методики COST 231-Nata для диапазона частот 1500-2000 МГц при тех же ограничениях:

для центра «большого города»

$$L_p = 48,5 - 13,82 \lg h_{баз.ст} + 35,4 \lg f - (1,1 \lg f - 0,7) \cdot h_{моб.т} + (44,9 - 6,55 \lg h_{баз.ст}) \cdot lgr, \text{ дБ}; \quad (2)$$

для сельской местности:

$$L_p = 9,56 - 13,82 \lg h_{баз.ст} + 53,7 \lg f - (1,1 \lg f - 0,7) \cdot h_{баз.ст} + (44,9 - 6,55 \lg h_{баз.ст}) \cdot lgr - 4,78 (\lg f)^2, \text{ дБ}; \quad (3)$$

для открытой местности:

$$L_p = 4,56 - 13,82 \lg h_{баз.ст} + 53,7 \lg f - (1,1 \lg f - 0,7) \cdot h_{баз.ст} + (44,9 - 6,55 \lg h_{баз.ст}) \cdot lgr - 4,78 (\lg f)^2, \text{ дБ}. \quad (4)$$

Большинство авторов статей отмечает, что наиболее существенный вклад в уровень поля в точке наблюдения вносят эффекты дифракции волн на препятствиях, расположенных вдоль линии, соединяющей антенны базовой станции и мобильного терминала, а также однократные переотражения от поверхностей крупных строений.

В [2] проведена оценка вклада переотраженных лучей в результирующее поле. При этом влияние земной поверхности учитывалось введением квадратичного множителя ослабления. Мощность, на выходе антенны мобильного терминала с учетом изменения её эффективной площади при приеме лучей записывается в следующем виде

$$P_{инт.ср} = \sum_{i=1}^n \frac{(h_{баз.ст} h_{моб.т})^2}{l_{ил}^4} \cdot \Gamma^2, \quad (5)$$

где: $l_{ил}$ - длина траектории i - го луча,

Γ - модуль коэффициента отражения волны от поверхности зданий.

В этой работе также отмечается, что величину потерь сигнала на трассе с относительно свободной городской застройкой можно определить по формуле

$$L = \max(L_0, L_{пз}) + L_d + L_\Gamma, \text{ дБ}, \quad (6)$$

где: $L_0 = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)$ - величина потерь мощности в свободном пространстве, дБ;

$L_{пз} \approx 20 \lg (h_{баз.ст} h_{моб.т} / r^2)$ - ослабление сигнала при распространении над плоской землей, дБ;

L_D - множитель ослабления сигнала при дифракции излучения на неровностях рельефа местности, дБ;

$L_r = -10 \lg V_r$ - ослабление сигнала при дифракции его на ближайшем к подвижному объекту здании (последовательность зданий) или естественной сравнительно резкой неоднородности местности (например, откосе или реальной возвышенности), дБ.

Величина L_r обычно определяется потерями при дифракции Френеля на клиновидном или сферическом препятствии.

Выражение для средней мощности принимаемого сигнала при $r/l \gg 1$ имеет вид

$$P_p = \Gamma^2 \frac{h_{\text{баз.ст.}}^2 \cdot h_{\text{моб.т.}}^2 l^{3/2}}{S_{\text{ср}} r^{7/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r}{l}\right), \quad (7)$$

где: $S_{\text{ср}}$ - средняя площадь, занимаемая одним зданием.

Акеяма А., Нагасу Т. и Ебини У. предложили [3] следующее расчетное выражение

$$E = E_{\text{мед}} + \Delta P_{\Sigma} + \Delta h_{\text{эф}} + \Delta K_{\text{об}}, \quad \text{дБ}, \quad (8)$$

где: $E_{\text{мед}}$ – медианное значение напряженности поля при высоте подвеса антенн мобильных терминалов 10 м, дБ;

ΔP_{Σ} - значение поправки на эффективную излучающую мощность P_{Σ} , дБ;

$\Delta h_{\text{эф}}$ - значение поправки на эффективную высоту подвеса антенн, дБ;

$\Delta K_{\text{об}}$ - значение поправки на окружающую обстановку, дБ

$$\Delta K_{\text{об}} = F(S_{\text{гор.зас}}) + \Delta K_{\text{х.м}} + \Delta K_{\text{г.м}} + \Delta K_{\text{накл}} + \Delta K_{\text{с.м.с}}, \quad \text{дБ} \quad (9)$$

$\Delta K_{\text{накл}}$ - поправка на наклон земной поверхности, дБ.

Отмечается, что величина $S_{\text{гор.зас}}$ дается только в пределах 5-40 %.

В случае, если $S_{\text{гор.зас}} \leq 1\%$ $F(S_{\text{гор.зас}}) = 20$, дБ;
 если $1\% < S_{\text{гор.зас}} < 5\%$ $F(S_{\text{гор.зас}}) = -3,74 \lg S - 9,75 (\lg S_{\text{гор.зас}})^2 + 20$, дБ;
 если $5\% < S_{\text{гор.зас}} < 40\%$ $F(S_{\text{гор.зас}}) = -19 \lg S_{\text{гор.зас}} + 26$, дБ.

Данная работа может быть полезна при использовании программного обеспечения при расчете уровней напряженности поля в городских условиях.

В том случае, когда высота подвеса антенны базовой станции значительная и в точку приема кроме дифрагированного луча могут попасть несколько отраженных лучей, можно посмотреть работу Ибрагима, в которой предлагается определять величину потерь при отражении волны от стен зданий β по формуле

$$\beta = 20 + \frac{f}{40} + 0,18L \cdot S_{\text{гор.зас}} - 0,34H_{\text{прос.мест}} + \Delta K_{\text{об}}, \quad \text{дБ}, \quad (10)$$

где: $\Delta K_{\text{об}} = 0,094S_l - 5,5$, дБ;

$S_{\text{гор.зас}}$ - коэффициент, равный % площади, застроенной зданиями;

S_l - коэффициент, равный % площади, застроенной четырех и более этажными зданиями;

$H_{\text{прос.мест}}$ - высота «просвета» между антеннами базовой станции и мобильного терминала.

В методике [4] частично используются результаты двух предыдущих методик и она рекомендована ИТУ-R для расчета макро- и микросотовых систем с различной высотой подвеса антенны базовой станции при $f = 800-2000$ МГц, $r = 0,02-5$ км, $h_{\text{моб.т.}} = 1-3$ м, $h_{\text{баз.ст.}} = 4-50$ м.

В случае отсутствия прямой видимости между антеннами базовой станции и абонентского терминала основные потери распространения определяются потерями при рассеивании множественной дифракцией на крышах зданий и потерями за счет дифракции с крыши соседнего здания.

Потери за счет дифракции с крыши соседнего здания $L_{\text{диф.сос.зд}}$ находятся из (11),

но поправка на ориентацию улицы меняется:

$$L_{\text{диф.сос.зд}} = -5,8 - 10 \lg(2b_{\text{ул}}) + 10 \lg f + 20 \lg(H_{\text{зд}} - h_{\text{моб.т}}) + 10 \lg(\sin \varphi) - 10 \lg(1 + 3/L_{\text{отр}}^2) \quad (11)$$

$$L_{\text{диф.зд}} = -10 + 0,354\varphi, \text{ дБ при } 0^\circ < \varphi < 35^\circ;$$

$$L_{\text{диф.зд}} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35), \text{ дБ при } 35^\circ < \varphi < 55^\circ; \quad (12)$$

$$L_{\text{диф.зд}} = 4,0 - 0,114(\varphi - 55), \text{ дБ при } 55^\circ < \varphi < 90^\circ.$$

В методике [5] напряженность поля определяется интерференцией двух лучей - дифрагированных на клиновидном препятствии (прямого) и отраженного от стены здания.

Напряженность поля определяется по формуле

$$E = \left(\frac{0,225}{\sqrt{2}}\right) E_0 \cdot \sqrt{\frac{\lambda[b_{\text{ант}} + (4b - b_{\text{ант}})/L_{\text{отр}}^2]}{H_{\text{зд}} - h_{\text{моб.т}}}} \cdot \sqrt{\sin \varphi}, \quad (13)$$

где: φ - угол скольжения прямого луча (угол между направлением улицы и направлением от антенны базовой станции к антенне мобильного терминала);

$2b_{\text{ул}}$ - ширина улицы, м;

$b_{\text{ант}}$ - расстояние от стены здания до приемной антенны, м;

$L_{\text{отр}}$ - потери за счет отражения. В расчётах можно принять $L_{\text{отр}} = 0,5$ дБ.

К недостаткам методики можно отнести невозможность расчета на радиальной улице и отсутствие зависимости от высоты подвеса антенны базовой станции, что скажется при расчете поля в микро и пикосотах.

Следующая методика [6] базируется на документах ITU-R и пригодна для расчета напряженности поля в городе и на сухопутной трассе. Так, напряженность поля в городе на расстоянии r от базовой станции, превышаемая в L % мест приема и в T % времени определяется выражением

$$E(r, L, T) = P_{\Sigma} + E(50, 50) + \Delta K_{\text{х.м}} + \Delta h_{\text{моб.т}} + \Delta E(L) + \Delta E(T) + F(S_{\text{Гор.зас}}), \text{ дБ} \quad (14)$$

где: $E(50, 50)$ - медианное значение напряженности поля (по 50%) мест и времени при высоте подвеса антенн мобильного терминала $h_{\text{моб.т}} = 10$ м, $P_{\Sigma} = 0$ дБ (1 кВт), определяемое графически;

$\Delta K_{\text{х.м}}$, $\Delta h_{\text{моб.т}}$ - поправочные коэффициенты, учитывающие степень неровности местности и высоту подвеса антенн мобильного терминала, дБ;

$\Delta E(L)$ и $\Delta E(T)$ - отклонения значений напряженности поля от медианного значения в заданных процентах мест L и времени T приема, дБ;

$S_{\text{Гор.зас}}$ - плотность городской застройки в %, определяемая графически;

$F(S_{\text{Гор.зас}})$ - дополнительное ослабление в городе, дБ.

Степень неровности местности оценивается параметром $\Delta h_{\text{м}}$, который определяется как разница высот (отметок) местности, превышаемых на 10 и 90% на определенном расстоянии.

Для расчета поля в городе в формулу (14) добавляется коэффициент $F(S_{\text{Гор.зас}})$, учитывающий дополнительное ослабление и зависящий от плотности застройки города $S_{\text{Гор.зас}}$. Для большого города значение $F(S_{\text{Гор.зас}})$ составляет порядка 10-15 дБ.

Для городов характерно при уменьшении высоты подвеса антенн мобильного терминала с 10 до 3 м уменьшение напряженности поля на 7-9 дБ.

Методика расчета, предложенная выражением (15), также широко используется в дециметровом диапазоне [7], где коэффициенты n_1 и n_2 соответственно равны для сельской местности 2,35 и 49; для пригородной местности - 3, 84 и 61,7; для г. Токио - 3,05 и 84, а для г. Нью-Йорк - 4,8 и 77.

$$L_p = 10n_1 lgr + n_2 - 20 lgh_{\text{баз.ст}} - 10 lgh_{\text{моб.т.}} + 59, \text{ дБ.} \quad (15)$$

Согласно методике расчета [8] потери радиоволны определяются выражением

$$L = L_0 + L_{\text{д.зд}} + L_{\text{м.д.кр}}, \text{ дБ,} \quad (16)$$

где: $L_{\text{д.зд}}$ - потери при дифракции волны с крыши здания к мобильному терминалу, а также потери при рассеивании, дБ;

L_0 - величина потерь мощности в свободном пространстве;

$L_{\text{м.д.кр}}$ - описывает множественную дифракцию на крышах зданий, дБ.

Введя следующие параметры: $2b_{\text{ул}}$ - ширина улицы, $b_{\text{ант}}$ - расстояние от стены соседнего здания до антенны мобильного терминала получаем второй член (16)

$$L_{\text{д.зд}} = 10lg \left[\frac{\lambda}{2\pi\sqrt{(H_{\text{зд}} - h_{\text{моб.т.}})^2 + b_{\text{ант}}^2}} \left| \frac{1}{\theta'} - \frac{1}{2\pi + \theta'} \right|^2 \right], \text{ дБ,} \quad (17)$$

где:

$$\theta' = \arctg[(H_{\text{зд}} - h_{\text{моб.т.}})/b_{\text{ант}}]. \quad (18)$$

При наличии на пути распространения волны зданий с высотами, значительно меньшими среднего уровня, необходимо исключить их из расчета по причине малого влияния на распространение. Здания вдоль линии визирования, попавшие в объем первой зоны Френеля, могут быть идентифицированы, как существенные для формирования поля в точке приема.

Немаловажным фактором является учет того, что отражающая поверхность зданий не является сплошной, а, как правило, имеет некоторый процент окон, для учета которых используется дополнительный эмпирический множитель в коэффициенте отражения Френеля. Его значение зависит от расположения антенны мобильного терминала относительно отражающей поверхности и от размеров окон. В результате отраженная волна ослабляется в среднем на 2-4 дБ.

В [9] рассмотрены некоторые методики расчета характеристик сигналов мобильной связи. В ней также рассмотрены две эмпирические методики расчета величины потерь. Первая основана на методе наименьших квадратов и имеет вид

$$L_p = L(r_0) + n_2 + n10 lg \left(\frac{r}{r_0} \right), \text{ дБ,} \quad (19)$$

где: r_0 - точка отсчета на расстоянии 1 км;

r -расстояние в км;

n - экспонента потерь на трассе.

Вторая методика - методика Стэнфордского университета предназначена, в основном, для сильно пересеченной местности и может быть частично использована в пригородной местности.

В рекомендации ИТУ-R [10] приводятся методики расчета ослабления мощности на входе приемного устройства, рекомендуемые при планировании систем радиосвязи малого (около 1 км) радиуса действия вне помещений в диапазоне от 300 МГц до 100 ГГц.

Согласно Рекомендации ИТУ-R [11] статистические распределения напряженности поля по местоположению и во времени аппроксимируются логарифмически-нормальным законом, параметрами которого являются медиана и стандартное отклонение. Приведенные в данной Рекомендации материалы приняты для прогнозирования напряженности поля в полосе частот от 30 до 3000 МГц и расстояний от 1 до 1000 км и описывают уровни напряженности, создаваемые полуволновым диполем при $P_{\Sigma}=1$ кВт, в виде функций различных параметров. Высота подвеса передающей антенны $h_{\text{баз.ст.эф}}$ варьируется в пределах от 10м и выше относительно подстилающей поверхности.

Эффективная высота подвеса антенны базовой станции $h_{\text{баз.ст.эф}}$, определяется как ее высота в метрах над средним уровнем земли.

В случае отсутствия информации о рельефе местности при составлении прогнозов распространения значение параметра $h_{\text{баз.ст.эф}}$, (для кривых распространения) рассчитывают в соответствии с длиной трассы r следующим образом $h_{\text{баз.ст.эф}} = h_{\text{баз.ст}}$ для $r \leq 3$ км и $h_{\text{баз.ст.эф}} = h_{\text{баз.ст.эф}} + (h_{\text{эфф}} - h_a)(r - 3)/12$ для $3 \text{ км} < r < 15 \text{ км}$, где h_a – высота подвеса антенны над землей. В случае наличия информации о рельефе местности при прогнозировании распространения $h_{\text{баз.ст.эф}} = h_b$, где h_b – высота подвеса антенны над высотой рельефа местности, усредненной для расстояний в диапазоне $0,2r$ и r .

Определение параметра высоты подвеса антенны базовой станции $h_{\text{баз.ст.эф}}$. Значение $h_{\text{баз.ст.эф}}$ определяет выбор кривой или кривых, из которых надо получить значения напряженности поля, а также экстраполяцию или интерполяцию, которая может потребоваться. Аналогично определяются поправки и для других переменных расчетного выражения.

Поскольку методики Хата предназначены для расчета уровней поля над квазигладкой поверхностью земли, то в случае холмистой местности при расчете могут возникнуть существенные погрешности. В связи с этим в [12] предлагается ввести в методики Хата поправочный коэффициент в виде слагаемого $\Delta K_{\text{х.м}}$ на холмистость местности приведеннымодернизированные методики Хата для города Ташкента:

- для районов города со средней плотностью застройки

$$L = -27,55 - 13,82 \lg(h_b/h_0) + 27,72 \lg(f/f_0) - [1,1 \lg(f/f_0) - 0,7] \cdot (h_m/h_0) + [31,9 - 6,55 \lg(h_b/h_0)] \cdot \lg(r/r_0) + L_{\text{вз}} + K_{\text{х}}, \text{ дБ}; \quad (20)$$

- для районов города с малой плотностью застройки

$$L = -32,17 - 13,82 \lg(h_b/h_0) + 27,72 \lg(f/f_0) - [1,1 \lg(f/f_0) - 0,7] \cdot (h_m/h_0) + [25 - 6,55 \lg(h_b/h_0)] \cdot \lg(r/r_0) + L_{\text{вз}} + K_{\text{х}}, \text{ дБ}; \quad (21)$$

- для широких радиальных улиц

$$L = -29,55 - 13,82 \lg(h_b/h_0) + 27,72 \lg(f/f_0) - [1,1 \lg(f/f_0) - 0,7] \cdot (h_m/h_0) + [27 - 6,55 \lg(h_b/h_0)] \cdot \lg(r/r_0) + K_{\text{х}}, \text{ дБ}; \quad (22)$$

- для широких поперечных улиц

$$L = -27,41 - 13,82 \lg(h_b/h_0) + 27,72 \lg(f/f_0) - [1,1 \lg(f/f_0) - 0,7] \cdot (h_m/h_0) + [37 - 6,55 \lg(h_b/h_0)] \cdot \lg(r/r_0) + L_{\text{вз}} + K_{\text{х}}, \text{ дБ}. \quad (23)$$

Заключение

Представленные методики расчета уровней поля могут быть использованы для прогнозирования уровней сигналов мобильной радиосвязи в городе и пригороде. Следует отметить, что для использования детерминистских методик нужна точная цифровая карта городской застройки с приведенными архитектурными элементами зданий - балконами, окнами и т.д. Эмпирические же методики пригодны для той архитектурной застройки города, где они были получены. Их можно использовать и в городских районах со схожей архитектурой.

Наибольший интерес представляют модернизированные методики Хата, учитывающие архитектуру городской застройки.

Таким образом, можно спрогнозировать ослабление поля до мобильных терминалов и при необходимости оптимально расположить источники электромагнитного излучения.

Список использованной литературы

1. Ликонцев Д.Н. Конспект лекций по дисциплинам «Антенны телевизионных и радиовещательных систем», «Антенны мобильных систем связи» и «Устройства СВЧ и антенны» в 5 частях для магистрантов специальностей «5А311201 - Устройства и системы телевидения, радиосвязи и радиовещания», «5А311401 - Мобильные системы связи» и «5А311103 - Радиотехнические устройства и устройства радиосвязи», ТУИТ, Ташкент, 2012.
2. Алимов В.А., Коробков Ю.С., Морозов В.И. и др. Характеристики УКВ сигналов в канале связи с подвижными объектами в условиях города // Радиотехника-1984.- №4.- С.21-24.
3. Akeyama A., Naqatsu T. and Ebine Y. Mobile radio propagation characteristics and radiozone design method in local cities. // Review of the Electrical Communication Laboratories. – 1982.- № 2.
4. Walfish Y. and Bertoni H.L. A theoretical model of UHF propagation in urban environments // IEEE Trans. Antenn and Propag. – 1988.- AP.38- №12.
5. Ikegami F. et all. Theoretical prediction of mean field strength on urban mobile radio // IEEE Trans. Anten. and Propag. - 1991. - AP.39. - №3.
6. Локшин М.Г., Шур А.А., Кокорев А.В., Краснощеков Р.А. Сетителевиизионноизвукового ОВЧ - ЧМвещания: Справочник- М.: Радиоисвязь, 1988.
7. W.C.Y. Lee, D.J.Y. Lee Microcell Prediction in Dense Urban Area // IEEE Trans. on Vehicular Technology. Vol. 47.-No.1.- February 1998.-P. 246-253.
8. Xia H.H. A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments // IEEE Trans. Veh. Technol.-1997.- VT. 46. -№4.
9. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Сиверс М.А., Волков А.Н., Певцов Н.В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. - СПб: Триада, 2003.
10. Рекомендация МСЭ-R P.1411-5 Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц. С.1-26.
11. Рекомендация МСЭ-R P. 1546-5 Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. С.1-57.
12. Shakhobiddinov A.Sh., Nazarov A.M., Likontsev A.N., Yusupova A.R. Influence of urban architecture features on attenuating of a field strength levels of mobile communication// International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology.- 2017.Vol.4 –Issue 6.-PP.4027 - 4031. (05.00.00; №8.IF:4, 346).