

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЧАСТОТНО-НЕСЕЛЕКТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И СИСТЕМ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Потапов А.А.

Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Рассматриваются результаты, полученные автором при экспериментальных исследованиях электромагнитной безопасности урбанизированных территорий с применением широкополосных частотно-неселективных измерений уровней радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП РЧ). Проанализированы характеристики доступных средств объективного контроля электромагнитной безопасности и способы применения геоинформационных систем (ГИС) в задачах экологического мониторинга ЭМП РЧ в обитаемых средах.

В неоднородной среде обитаемых территорий электромагнитная обстановка формируется сложным комплексом волновых процессов (быстрые замирания, дифракционные, волноводно-резонансные эффекты) [1], экологическая значимость которых изучена еще недостаточно из-за все еще не сформировавшейся методологической базы мониторинговых процедур. В качестве основы для гигиенического мониторинга электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) чаще всего получают развитие методы частотно-неселективных широкополосных измерений напряженности электрической компоненты поля, а при оценке безопасности радиоэлектронных средств методы измерений специфических параметров корректно определяемых только в лабораторных условиях, например, удельной поглощаемой мощности (specific absorption rate – SAR) [2].

Требования к методам экологического мониторинга определяются действующими санитарными нормами [3-5]. В РФ для населения установлены предельно-допустимые уровни на ЭМП РЧ, представленные в таблице 1. Из таблицы видно, что федеральными нормативами ПДУ на ЭМП систем сотовой связи [3] вводятся отдельно, хотя они и численно совпадают с ПДУ для объектов радиовещания [4]. В г. Москве установлены более жесткие ПДУ [5], распространяющиеся на все типы радиотехнических объектов вне зависимости от их функционального назначения и принадлежности.

Табл. 1 – Предельно допустимые уровни ЭМП РЧ в соответствии федеральными и региональными нормативами [3-5].

Нормативный документ	Предельно-допустимые уровни напряженности электрического поля в диапазонах частот				
	30 кГц – 0,3 МГц, В/м	0,3 – 3 МГц, В/м	3 – 30 МГц, В/м	30 – 300 МГц, В/м	300 МГц – 300 ГГц, мкВт/см ² *
-	Селитебная территория				
СанПин 2.1.8/2.2.4.1190-03 [3]	25,0	15,0	10,0	3,0	10,0
СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 [4]	25,0	15,0	10,0	3,0	3,0
МГСН 2.03-97 [5]	15,0	15,0	10,0	3,0	3,0
-	Помещения жилых зданий, гостиниц, дошкольных, общеобразовательных и медицинских учреждений всех типов				
СанПин 2.1.8/2.2.4.1190-03 [3]	25,0	15,0	10,0	3,0	10,0

СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 [4]					
МГСН 2.03-97 [5]	10,0	10,0	7,0	2,0	2,0
Примечание: * 2,0 мкВт/см ² = 2,7 В/м; 3,0 мкВт/ см ² = 3,4 В/м; 10,0 мкВт/ см ² = 6,1 В/м; все соотношения приведены для дальней зоны излучения (т.е. для расстояний более 5 – 10 длин волн от источника).					

Для частот выше 300 МГц санитарными нормами ПДУ устанавливаются в единицах плотности потока энергии. В дальней зоне излучения или зоне сформированной электромагнитной волны между плотностью потока энергии и напряженностью поля существует неизменное соотношение (1):

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (1)$$

где S – плотность потока энергии, Вт/м²; E – напряженность электрического поля, В/м.

Санитарными нормами ПДУ установлены для достаточно широких полос частот, кроме того абсолютные уровни ПДУ таковы, что маловероятно их превышение на расстоянии более нескольких десятков метров от наиболее часто встречающихся в быту и на селитебной территории радиотехнических устройств (базовые станции сотовой связи, станции беспроводной передачи данных и т.д.). Эти особенности сформировали требования (по ширине полосы пропускания и чувствительности) к производимым на территории РФ и за рубежом техническим средствам объективного контроля электромагнитного загрязнения в качестве которых чаще всего выступают широкополосные частотно-неселективные измерители уровня поля, технические характеристики которых приведены в таблице 2.

Табл. 2 – Основные технические характеристики распространенных средств объективного контроля электромагнитного загрязнения.

Марка прибора	Измерительная антенна*	Диапазон измерений по напряженности поля, В/м	Рабочий диапазон частот, ГГц	Ширина полосы пропускания антенны, ГГц	Номер в гос. реестре средств измерений РФ	Производитель
ПЗ-40	АП-1	1 – 615	0,3 – 40,0	39,7	23540-02	НПП «Циклон-Прибор»
	АП-3	5 – 615	0,3 $\cdot 10^4$ – 0,3	0,30		
ПЗ-31	А1	1 – 615	0,3 – 40,0	39,7	27571-04	ФГУП «СКБ РИАП»
	А4	2 – 600	0,3 $\cdot 10^4$ – 0,3	0,30		
ПЗ-33	штатная, фиксированная	0,6 – 30,7	0,3 – 4,0	3,7	29784-05	ООО «НТМ-Защита»
ПЗ-33М	штатная, фиксированная	1,9 – 19,4	0,3 – 18,5	18,2	35282-07	ООО «НТМ-Защита»
РММ 8053А	ЕР-44М	0,25 – 250	1 $\cdot 10^4$ – 0,8	0,79	-	РММ, Италия
	ЕР-408	0,80 – 800	0,001 - 40	39,999	-	
NBM-550	EF0391	0,20 – 320	1 $\cdot 10^4$ – 3	2,999	-	Narda Safety Test Solutions, ФРГ
	EF0691	0,35 – 650	1 $\cdot 10^4$ – 6	5,999	-	
	EF6091	0,7 – 400	0,1 – 60	59,9	-	
TES-92 (АТТ-	штатная, фиксированная	0,020 – 11	0,05 – 3,5	3,45	-	TES, Тайвань

2592)	нная					
TES-593 (АТГ- 2593)	штатная, фиксирова нная	0,020 – 108	0,01 – 8	7,99	-	TES, Тайвань
Примечание: * – при наличии нескольких сменных измерительных антенн						

Как видно из таблицы 2, для частот ниже 300 МГц производителями приборов выпускаются измерительные антенны, объединяющие до 4-х диапазонов санитарных норм. Для частот выше 300 МГц представленная на рынке аппаратура, в зависимости от модификации, работает в диапазоне до 4...60 ГГц, что, с одной стороны, охватывает большую часть спектра реально функционирующих радиотехнических устройств, но с другой не покрывает весь определенный нормативами частотный диапазон, т.е. не может быть оценена электромагнитная безопасность радиорелейных и ряда других устройств функционирующих в КВЧ диапазоне.

Нижний порог чувствительности технических средств экологического мониторинга ЭМП РЧ составляет порядка 1/2 от величины соответствующих ПДУ (≈ 1 В/м). Измерительные антенны, представленные в таблице 2, имеют изотропную диаграмму направленности, что обычно достигается за счет использования в качестве детекторов трех дипольных антенн, установленных во взаимно ортогональных направлениях. Фиксация среднеквадратических значений напряженности электрического поля обеспечивается за счет подключения к антенным элементам диодов с квадратичной вольтамперной характеристикой. В некоторых образцах измерительной аппаратуры зарубежного производства используются детектирующие элементы на основе термопар, что позволяет получать корректные среднеквадратические результаты при измерениях импульсных ЭМП РЧ (радары и т.п.), но снижает нижний порог чувствительности до 8...18 В/м [6].

Проанализируем достоинства и недостатки использования вышеуказанных технических средств применительно к задачам экологического мониторинга ЭМП РЧ. К достоинствам данной аппаратуры можно отнести:

- ✓ Возможность интегральной оценки уровня поля в пределах рабочего диапазона частот при отсутствии или существенном недостатке информации о характеристиках (расположении, частоте, модуляции, мощности, диаграмме направленности и т.п.) потенциально-опасных радиотехнических устройств и установок;
- ✓ Возможность вывода результатов для частотных диапазонов и непосредственно в единицах измерения, установленных санитарными нормами, что позволяет производить прямое сравнение значений ПДУ и результатов измерений без дополнительных расчетов;
- ✓ Наличие у многих марок измерительной аппаратуры функций автоматической записи в память прибора измеренных значений и интерфейса связи с ЭВМ позволяет производить временной анализ экологической обстановки в искомой точке.

К недостаткам традиционных экологических измерителей ЭМП РЧ следует отнести:

- ✓ Высокий нижний порог по напряженности поля (плотности потока энергии) не позволяет при использовании большинства приборов получать непрерывные при

перемещении антенны описания пространственной структуры электромагнитных полей и оценивать их реальную интенсивность и изменчивость;

- ✓ Очень широкая полоса пропускания измерительных антенн (особенно для диапазона выше 300 МГц) не позволяет производить идентификацию источника электромагнитного загрязнения (телевещание, сотовая связь, Wi-Fi и т.п.), а также выявлять индивидуальный вклад каждого источника ЭМП РЧ. Невозможность идентификации источника электромагнитного загрязнения при выявлении превышения ПДУ существенно затрудняет как выработку мотивированных решений по защите от электромагнитного излучения (экранировка, снижение мощности), так и шагов по правовой оценке факта нарушения санитарных норм

При экспериментальных исследованиях электромагнитной безопасности территорий исследователи часто ограничиваются лишь анализом пространственного распределения поля на расстоянии до 20...30 м источников ЭМП РЧ, где структура поля полностью определяется диаграммой направленности антенн [7] или составлением сводных таблиц со средними и максимальными значениями поля по отдельным участкам обследованной территории [8], т.е. игнорируя задачу изучения пространственного распределения поля. Средние значения напряженности ЭМП РЧ базовых станций сотовой связи по данным [8] составили 0,82 В/м для жилых территорий города на высоте 2 м от земли и 0,93 В/м вблизи первого ряда зданий вокруг БС. Максимальные зафиксированные уровни поля составили 1,19 и 1,87 В/м соответственно. Единичные опубликованные случаи картографического представления данных об электромагнитной обстановке обычно характеризуют ситуацию (в долях ПДУ) вблизи радиовещательных объектов на основе лишь расчетных данных, при этом алгоритм расчета не учитывает ни влияние застройки ни иных источников экологической опасности (сотовая связь и т.д.) [9].

В зарубежной практике методы анализа пространственного распределения поля, в том числе с применением геоинформационных систем и цифровых карт местности различной детализации, получили более широкое распространение. Однако зачастую измерения проводятся вдоль определенных профилей в качестве линий которых выступают участки дорожной сети, т.к. используются измерительные комплексы автомобильного базирования [10]. В результате публикуемые результаты характеризуют электромагнитную обстановку на участках местности не имеющих высокой экологической значимости, поскольку человек, передвигаясь на транспорте пребывает в обследованных зонах кратковременно, а также частично защищен от внешнего излучения металлическим корпусом транспортного средства. В [10] напряженность электрического поля в полосе частот 0,1...3 ГГц вдоль автотрасс составляла от 0,4...1 В/м до 3...6 В/м на удалении до 200...300 м от БС и в до 3...5 В/м (в отдельных точках до 20 В/м) на расстояниях до 100 м от БС.

В случае пешеходной съемки (на высоте 1,7 м от земли), проведенной одним из исследователей [11], пространственное разрешение экологического мониторинга составляет от 50...60 м и более, причем часто измерения могут проводиться только в условиях прямой видимости источников базовых станций сотовой связи. В этом случае напряженность поля в полосе частот 0,1...3 ГГц составляла от 0,19...0,6 В/м до 1,9...2,5 В/м при этом максимальные уровни ЭМП РЧ фиксировались как вблизи, так и на

удалении до 150...200 м от БС, скорее всего в зависимости от условий видимости антенн БС.

В [12] частотно-селективные измерения позволили провести частотную декомпозицию структуры электромагнитного загрязнения и выделить вклад в него базовых станций сотовой связи для целого ряда населенных пунктов. В среднем напряженность электрического поля, генерируемого БС, в точках с наиболее высокими в данном населенном пункте значениями составила 0,34 В/м, варьируясь пределах от 0,05 до 0,56 В/м. При этом значения напряженности поля, осредненные по всему населенному пункту составляли от 0,04 до 0,5 В/м. В ряде населенных пунктов основным источником электромагнитного загрязнения являлись радиовещательные центры АМ и FM диапазонов, создававшие напряженность поля в среднем по населенному пункту до 0,5...0,9 В/м. Точки измерения расположены преимущественно вдоль автодорожной сети (измерительный комплекс базировался на автомобиле) и степень пространственной детализации составляет от десятков до 100...250 м.

Объективная оценка экологической обстановки в условиях неоднородных многокомпонентных сред невозможна без адекватной информации о пространственной и временной изменчивости факторов окружающей среды, а также без интеграции и обработки этой информации с использованием метрически корректных цифровых моделей среды обитания человека. Городские территории предъявляют наиболее высокие требования к пространственному разрешению экологического мониторинга из-за своей сложной пространственной организацией, структура которой определяет как распределение интенсивности физических полей, так и подвергающегося их воздействию населения.

Анализ литературных данных и технических характеристик представленного на рынке контрольно-измерительного оборудования показывает, что в современных условиях актуальной задачей является разработка современной методологии проведения высокодетализированного и непрерывного в пространственном отношении экологического мониторинга ЭМП РЧ с применением широкополосных частотно-неселективных измерителей напряженности поля в условиях города.

В связи с этим автором был проведен высокодетализированный экологический мониторинг ЭМП РЧ участка территории МГУ им. М.В. Ломоносова в пределах которого имеется 6 мест установки антенн сотовой связи и еще 13 вне его на расстоянии до 1 км. Площадь обследованной территории составляет 0,51 км². Измерения напряженности переменного электрического поля (E , В/м) проводились с помощью высокочувствительного широкополосного измерителя TES-92 (Актаком АТТ-2592). Прибор оснащен изотропной антенной, обеспечивающей измерение полного вектора электромагнитного поля; рабочий диапазон частот 50 МГц...3,5 ГГц, диапазон измерений по напряженности поля 0,02...11 В/м, паспортная погрешность < 2,4 дБ.

Были проведены измерения в 266 точках на территории искомого участка на высоте 1,6...1,7 м от земли. Использовалась следующая методика: в каждой точке проводилось 3 измерения в режиме фиксации максимальных уровней поля (режим Max) и 3 измерения максимальных уровней поля с осреднением (режим Max average) длительностью 20...30 секунд каждое, т.е. всего 6 измерений в каждой точке. После каждой пары измерений

(Max и Max average) антенна измерительного прибора смещалась в плане на случайную величину в диапазоне 20...30 см для минимизации влияния интерференционных эффектов. При обработке данных для каждого пункта измерений вычислялись средние значения Max и Max average. Измерения в режиме Max позволяют оценить максимальную величину поля, формирующуюся за счет многолучевого распространения радиоволн, подверженного ряду случайных вариаций; эта величина позволяет охарактеризовать потенциальную величину электромагнитной опасности в данной точке. Измерения в режиме Max average характеризуют величину поля с осреднением по времени, т.е. более стабильную составляющую электромагнитного загрязнения.

Пространственное разрешение исследования (среднее расстояние между ближайшими точками) составило 30,8 м; с наименьшей детализацией была обследована лесопарковая часть района (45,9 м), а с наибольшей участки в условиях видимости излучающих антенн (23,9 м). Работы проводились в апреле 2009 года в период до появления листвы на древесной и кустарниковой растительности. Основные результаты измерений приведены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты измерений напряженности переменного электрического поля в полосе 0,05...3,5 ГГц по 266 точкам измерений.

Характеристика	Измерения в режиме Max		Измерения в режиме Max average		
	В/м	дБ(мкВ/м)	В/м	дБ(мкВ/м)	
Средняя напряженность поля	0,59	110,9	0,38	106,9	
Среднеквадратическое отклонение средней величины	0,68	9,2	0,43	9,7	
Минимальная напряженность поля	0,02	85,1	0,01	82,5	
Максимальная напряженность поля	4,6	133,2	3,15	129,9	
Максимум/ Минимум, крат	Перепад поля, дБ	230	47,2	315	49,9

В соответствии с санитарными нормативами [5] для селитебных территорий для диапазона 0,3...300 ГГц установлен предельно-допустимый уровень (ПДУ) ЭМП РЧ равный 3,4 В/м. Как видно из таблицы 3, среднее значение напряженности поля по измерениям в режиме Max ниже ПДУ в 5,8 раза, а для Max average 8,9 раза. Превышается ПДУ только в двух точках в режиме Max (3,7 и 4,6 В/м соответственно), поэтому электромагнитная обстановка в целом соответствует принятым критериям безопасности. По абсолютным значениям представленные результаты близки к опубликованные в [8] и совпадают по диапазону вариаций с [10–12].

В пределах обследованной территории выявлена значительная неоднородность ЭМП РЧ с вариациями около 48 дБ, что соответствует перепаду напряженности поля в диапазоне около 250 крат; высокие значения среднеквадратических отклонений ($\approx 115\%$ от средних значений поля) свидетельствуют, что большие перепады поля существуют не только между точками с экстремальными значениями.

На основе сети из 266 измерений в среде геоинформационной системы ArcGIS методом сплайн интерполяции с барьерами (Spline with barriers) были созданы растровые Grid-матрицы с размером пиксела 1x1 м, отображающие пространственное распределения напряженности поля в обоих режимах измерения (рис. 1). В качестве барьеров интерполяции были использованы контура домов и границы обособленных участков

(общей площадью 0,07 км²) где измерения не проводились и, соответственно, они были исключены из процесса интерполяции.

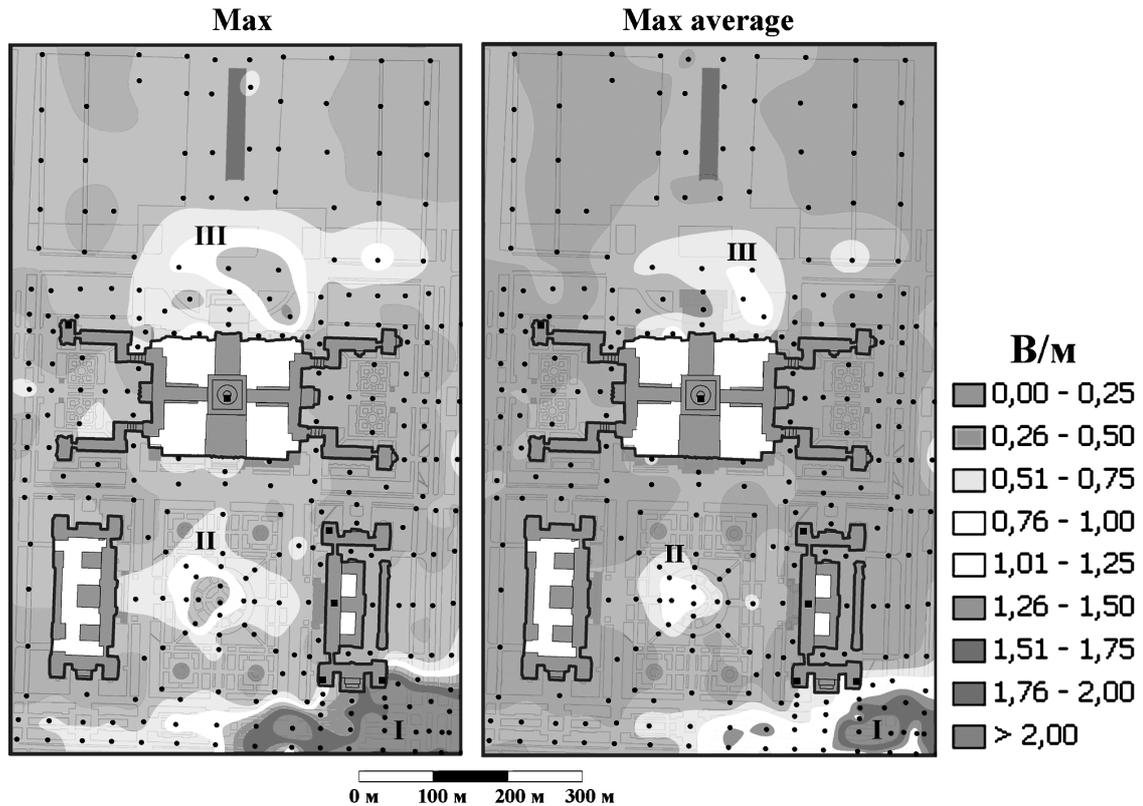


Рис. 1. Пространственное распределение напряженности поля в полосе частот 0,05...3,5 ГГц по результатам измерений в режиме Max (слева) и Max average (справа) показаны пункты измерений (точки) и БС сотовой связи (квадраты); вокруг зданий отображены барьеры интерполяции.

Как видно из рис. 1, на большей части обследованной территории напряженность электрического поля не превышала 0,5 В/м (в 67 % точек в режиме Max и 79 % Max average); поскольку в этом диапазоне амплитуд не было выявлено явных закономерностей распределения поля (помимо снижения до уровня <0,25 В/м в полузамкнутых дворах зданий и в глубине лесопарков), то это позволяет отнести величины поля $E < 0,5$ В/м к фоновым.

На территории можно выделить 3 зоны (№№ I – III, рис. 1) с повышенными уровнями ЭМП РЧ (>0,5 В/м). Визуальный анализ на местности показал, что все они располагались в местах видимости секторных антенн БС, с ориентацией в сторону наблюдателя. Протяженность этих зон по отдельным направлениям составляла: от 130...200 м до 400...550 м по результатам измерений в режиме Max и от 100...150 до 200...400 м в режиме Max average. Общая площадь этих зон составила 0,13 км² (25,4 % общей площади) и 0,06 км² (11,8 % общей площади) соответственно. Наиболее высокие уровни ЭМП РЧ были зафиксированы в зоне I в условиях одновременной видимости 3 БС.

На рис. 1 видны различия в пространственном положении контуров с напряженностью поля в 0,5 В/м и выше в режимах Max и Max average. Измерения в

режиме Max характеризуют максимальный предел вариаций уровня поля, формирующихся в точке за счет многолучевости, поэтому такие измерения позволяют охарактеризовать меру потенциальной опасности, поскольку амплитудные значения поля будут отражать пиковое количество энергии которое может быть зафиксировано от излучателя в данной точке. В режиме Max average случайные пульсации поля сглаживаются, что приводит к большей локализации границ зоны влияния радиотехнического средства. Эти различия можно рассматривать как переход от условий полной/частичной видимости излучающих антенн с выраженными и стабильными доминантами в многолучевой структуре поля, к хаотическому многолучевому полю, формирующемуся за счет процессов отражения и рассеяния, без выраженных и стабильных во времени доминант. В качестве границ зоны смены структуры многолучевого поля, по мнению автора, возможно использование контуров с равными значениями напряженности поля, но полученными при разных режимах измерения в условиях четкой локализации зоны влияния исследуемого радиотехнического объекта, т.е. в зоне перехода от зоны локального максимума к фоновым значениям поля.

Были проанализированы расстояния между контурами в 0,5 В/м для трех выделенных участков вблизи антенн БС (контур с этим значением присутствуют в каждой из них), характеризующие протяженность переходной зоны. Из Grid-матриц были выделены контура в 0,5 В/м и рассчитаны кратчайшие расстояния от точек одного контура до аналогичного, полученного в другом режиме измерения. Получены следующие результаты: зона I – среднее расстояние 19,5 м (min 5,0 м; max 77,4 м), зона II – среднее расстояние 20,7 м (min 4,9 м; max 40,0 м); зона III – среднее расстояние 42,5 м (min 5,0 м; max 111,2 м); в среднем по всем трем зонам – 27,6 м. Последнюю величину можно рассматривать как оценку характерного пространственного шага в пределах которого происходит смена структуры многолучевого поля.

Статистическая обработка результатов натурных изысканий позволила оценить применимость массовых частотно-неселективных измерителей ЭМП РЧ, используемых в экологической практике. Нижний порог чувствительности такого оборудования как было показано ранее составляет от 0,3 до 1,0 В/м. В таблице 4 приведены данные о количестве точек измерения где возможна корректная оценка напряженности поля в зависимости от порога чувствительности измерителя.

Табл. 4 – Оценка применимости средств объективного контроля ЭМП РЧ в зависимости от класса чувствительности.

Порог чувствительности, В/м	0,3	0,7	1,0
Количество точек, где E больше порога чувствительности (режим Max), %	64,7	20,7	14,7
Количество точек, где E больше порога чувствительности (режим Max average), %	45,9	14,3	8,3

Из таблицы 4 следует, что контрольно измерительная аппаратура с нижнем порогом чувствительности от 1 В/м и выше позволяет проводить объективную оценку

экологической обстановки менее чем в 15 % случаев, а при пороге от 0,7 В/м менее чем в 21 % случаев. Повышение чувствительности до 0,3 В/м и менее позволяет существенно улучшить вероятность корректных оценок величины поля – до 45,9...64,7 % в зависимости от режима измерения. Это свидетельствует о необходимости использования высокочувствительных технических средств (с порогом детектирования < 0,3 В/м) для объективной оценки электромагнитной безопасности городских территорий.

Анализ отношения $\varepsilon = E_{\max}/E_{\text{aver}}$ по всему массиву измерений показал, что в 30,5 % точек ε отличается не более чем на 10 %, а в 83,5 % случаев не более чем на 30 % от константы $\varepsilon_{\text{ст}}$, которая равна отношению максимальной и средней амплитуды гармонического сигнала, таблица 5.

Табл. 5 – Распределение значений величины ε для массива из 266 измерений.

Числовая характеристика	Количество точек у которых значение ε равен		
	$\varepsilon_{\text{ст}} \pm 10 \%$	$\varepsilon_{\text{ст}} \pm 20 \%$	$\varepsilon_{\text{ст}} \pm 30 \%$
Число точек измерений, единиц	82	161	222
% от общего количества измерений	30,8	60,5	83,5

Выявленная закономерность создает возможность уменьшить трудозатраты, отказавшись от измерений в одном из режимов, при проведении предварительных или ограниченных по времени работ, оставаясь в большинстве случаев в пределах допустимой погрешности ($\pm 30 \%$, [5]).

Для каждой экспериментальной точки была определена максимальная разница $\Delta_{\max 1-3}$ между тремя измерениями (в обоих режимах). Средние значения величины $\Delta_{\max 1-3}$ составили 2,5 дБ для режима Max и 2,7 дБ для режима Max average; среднеквадратические отклонения средних величин 2,2 и 2,1 дБ соответственно. Диапазон колебаний $\Delta_{\max 1-3}$ в обоих случаях составил от 0,1 дБ до 15,5 дБ.

Для подавляющей части территории $\Delta_{\max 1-3} < 5$ дБ. Значения от 5 до 10 дБ фиксировались локально, преимущественно в лесопарковых массивах из-за формирования близкорасположенными препятствиями (стволы деревьев) локальных зон радиотени и вблизи автомагистралей с интенсивным движением из-за наличия большого количества отражающих радиосигнал объектов (автотранспорт). Значения $\Delta_{\max 1-3} > 10$ дБ фиксировались вблизи входов в учебные корпуса, что связано с высокой плотностью прохожих, пользующихся средствами беспроводной связи.

Представление результатов измерений в логарифмическом масштабе позволило перейти к анализу пространственной неоднородности распределения напряженности электромагнитного поля. В зонах максимумов ЭМП РЧ протяженность участков с колебаниями поля менее 5 дБ составляла от 30...80 до 80...120 м (режим Max) и 70...150 м в режиме Max average. В плане участки имели неправильную часто вытянутую вдоль одного из направлений форму. По мере снижения напряженности ЭМП РЧ (на 5...10 дБ) протяженность зон с колебаниями поля менее 5 дБ составляла 70...180 м (Max)

и от 40...80 до 100...150 м в режиме Max average. Границы участков имели неправильную форму с тенденцией к фрагментации по мере удаления от зоны максимума.

В условиях фоновых значений напряженности поля ($E < 114$ дБ(мкВ/м)) протяженность и геометрическая форма участков с колебаниями менее 5 дБ (Max и Max average) имела сложный, геометрически трудно детерминируемый характер. Протяженность участков по характерным направлениям составляла от 60...120 м до 150...300 м; вблизи зданий отмечались локальные участки размером 20...50 м, а в пределах открытых пространств и лесопарковой зоны участки с колебаниями поля менее 5 дБ имели размер 100...200 м и более.

Таким образом, в условиях городских селитебных территорий пространственная структура ЭМП РЧ имеет очень широкий спектр пространственных вариаций как по размерам, так и по плановым очертаниям, в общем случае трудно детерминируемый. Поэтому при экологическом мониторинге ЭМП РЧ в условиях города шаг сетки измерений не должен быть грубее 40...50 метров на удалении более 250...300 м от источников излучения в условиях преимущественно открытой местности. Вблизи радиотехнических объектов пространственное разрешение измерений должно составлять не менее 20...30 м при этом расстояние до антенн источника излучения не является определяющим фактором электромагнитной безопасности из-за влияния застройки, зеленых насаждений и направленного характера излучателей сигнала.

Как было показано ранее в условиях сформировавшейся электромагнитной волны между напряженностью поля (E , В/м) и плотностью потока энергии (S , Вт/м²) существует неизменное соотношение, описываемое (1).

Соотношение (1) при проведении частотно-неселективных широкополосных измерений позволяет получить обобщенные энергетические параметры электромагнитного загрязнения территорий. Для этого с помощью (1) для каждой точки измерения рассчитывается плотность потока энергии S_i , Вт/м²; затем на основе полученных значений в среде ArcGIS с использованием ранее указанного алгоритма интерполируется растровая Grid-матрица с размером пикселя 1x1 м.

В большинстве случаев основной поток электромагнитного излучения от радиопередающих объектов направлен под небольшим углом к поверхности земли, поэтому величина S_i , определенная на основе приземных измерений (высота 1,6...1,7 м) характеризует общее количество энергии поступающей на поверхность земли. Доля отраженной энергии определяется коэффициентом отражения, зависящим от угла падения, поляризации и типа подстилающей поверхности – т.е. в общем случае трудно детерминируемых величин. Поэтому Q – **интегральная энергетическая нагрузка территории**, рассчитываемая для заданной территории на основе значений S_i (2), есть оценка предела суммарной энергетической нагрузки на территорию при наиболее благоприятных для поглощения радиоволн условиях:

$$Q = A \cdot \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2)$$

где S_i – значение i -го пикселя растровой поверхности, Вт/м²; A – площадь пикселя, м². Системой ArcGIS определяется сумма значений пикселей растровой поверхности, что обеспечивает автоматизированный расчет величины Q .

Расчет с помощью (2) показал: суммарная пиковая энергетическая экспозиция обследованной территории составила 564,3 Вт (режим Max), а пиковая с осреднением 229,1 Вт (режим Max average), что в расчете на квадратный километр составляет 1106,5 и 449,2 Вт/км² соответственно, т.е. для крупных городов и населенных пунктов с развитой радиотехнической инфраструктурой общая суммарная энергетическая нагрузка территорий может достигать десятков киловатт, что сопоставимо с мощностью промышленных радиовещательных установок.

На основе информации о пространственной структуре электромагнитного (а также любого другого, определяемого спецификой задачи) загрязнения возможна детерминированная оценка экологической безопасности критических элементов городской инфраструктуры с использованием объектно-ориентированного подхода. Для этого в среде ГИС осуществляется передача информации от растровых матриц, задающих пространственное распределение экологического фактора, в атрибуты цифровых моделей экологически значимых объектов. Т.е. реализуется оценка качества окружающей среды и безопасности посредством проецирования информации из массива данных (в общем случае многомерного) на цифровую модель(-ли) экологически важных объектов/территорий.

На рисунке 2 приведен пример практической реализации предлагаемого подхода. На основе созданных растровых матриц смоделировано распределение напряженности поля вдоль профиля длиной 550 м, проходящего по маршруту активного передвижения пешеходов около одного из учебных корпусов. Введение линейной системы координат профиля (длина от начала профиля), его разбиение точками с заданной дискретностью (5 м) и внедрение в их атрибуты значений напряженности ЭМП РЧ позволили получить метрически корректные кривые вариаций поля, извлеченные из растровой матрицы (значения Max).

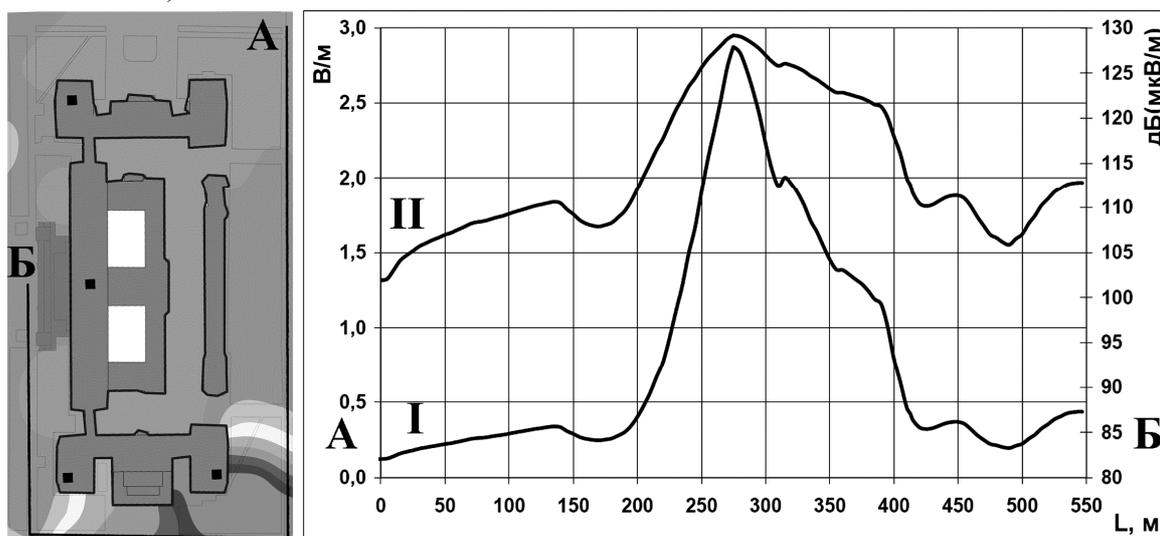


Рис. 2. Вариации напряженности поля в режиме Max в полосе 0,05...3,5 ГГц по профилю А–Б в В/м (кривая I) и дБ(мкВ/м) – кривая II.

Как видно из рис. 2, вдоль линии профиля имеются существенные вариации уровня поля: общий перепад напряженности поля составил более 20 крат без превышения ПДУ, градиент поля составил до 10...20 дБ/100 м. Значительные амплитудные перепады экологического фактора в условиях урбанизированных территорий свидетельствуют о важности объектно-ориентированного подхода для оценки экологических свойств пространства, подготовке мониторинговых мероприятий и мер по оптимизации экологической обстановки.

Выводы

1. С применением широкополосных частотно-неселективных измерений напряженности поля проведено исследование вариаций ЭМП РЧ в полосе частот 0,05...3,5 ГГц участка урбанизированной территории площадью 0,5 км² с пространственным разрешением от 24 до 46 м в 266 пунктах. Средний уровень напряженности поля по территории составил 0,59 В/м (режим измерений Max) и 0,38 В/м (режим Max average). Общий перепад напряженности поля в пределах территории составил 48 дБ.
2. Максимальные уровни ЭМП РЧ фиксировались при прямой видимости антенн базовых станций сотовой связи; в этих условиях протяженность участков с колебаниями поля менее 5 дБ составляла от 30...80 до 80...120 м (Max) и до 70...150 м (Max average). В зоне значений ЭМП РЧ менее 0,5 В/м протяженность участков с колебаниями до 5 дБ для обоих режимов измерений составляла от 60...120 м до 150...300 м; вблизи зданий уменьшаясь до 20...50 м.
3. Вариации напряженности поля в зоне радиусом 50...60 см за счет интерференционных эффектов в среднем составили 2,5 дБ для режима Max и 2,7 дБ для режима Max average; вариации более 5 дБ отмечались локально, преимущественно в местах постоянного движения пешеходов и автотранспорта. Отношение результатов измерений Max/Max average для 83,5 % обследованных точек отклонялось не более чем на 30 % от значения равного отношению максимальной и средней амплитуд гармонического сигнала.
4. Предложен алгоритм локализации и оценки протяженности зоны где повышенный уровень ЭМП РЧ формируется преимущественно за счет процессов отражения и рассеяния радиоволн; алгоритм основан на анализе пространственного расположения контуров с равными абсолютными значениями напряженности поля, но полученными при разных режимах измерения (Max и Max average) и позволяет определить зону потенциальной опасности радиотехнического объекта не выявляемой посредством измерений с длительной временем осреднения или недостаточным временным разрешением. Для обследованной территории ширина таких зон составила от 19,5 до 42,5 м.
5. Предложена методология оценки интегральной энергетической экспозиции территории по данным широкополосных частотно-неселективных измерений. Для обследованного участка местности показано, что в диапазоне частот 0,05...3,5 ГГц

суммарная пиковая энергетическая экспозиция составила 564,3 Вт (Max), а пиковая с осреднением 229,1 Вт (Max average).

6. С использованием возможностей ГИС разработан способ оценки экологической безопасности наиболее уязвимых участков городской инфраструктуры, основанный на проецировании информации из массива данных о пространственном распределении экологических факторов на комплекс цифровых моделей таких участков. На примере типичного маршрута движения людских потоков показано, что при отсутствии превышения действующих ПДУ общий перепад напряженности ЭМП РЧ составляет более 20 крат, а скорость изменения напряженности поля до 10...20 дБ/100 м.
7. Совокупность экспериментальных результатов свидетельствует о высокой пространственной неоднородности электромагнитной обстановки в радиочастотном диапазоне в условиях урбанизированных сред и необходимости использования высокочувствительной измерительной аппаратуры и геоинформационных технологий для ее объективной оценки.

Конец статьи.

Литература

1. Bertoni H.L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems. New Jersey: Prentice hall, 2001. – 340 p.
2. IEEE Std C95.3-2002. IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz. New York: IEEE, 2002. – 126 p.
3. СанПин 2.1.8/2.2.4.1190-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 27 с.
4. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 22 с.
5. Допустимые параметры электромагнитных излучений в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях МГСН 2.03-97. Москва: Научно-исследовательский и информационно-аналитический издательский центр (НИАЦ), 1997. – 15 с.
6. E-Field Probe EF5091. Data sheet. Narda Safety Test Solutions GmbH, 2008. – 2 p, http://www.narda-sts.de/pdf/hochfrequenz/DS_EF5091_EN.pdf (дата обращения 10.02.09).
7. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. Доклад. Серия докладов по политике в области охраны здоровья населения под редакцией А. К. Демина, № 4, М.: Фонд "Здоровье и окружающая среда" и Российская ассоциация общественного здоровья, 1997. – 93 с.
8. Grigoriev Y. Cell Towers – Results of Measurements and Estimation of Safety Limits for the Public. Salzburg: International Conference on Cell Tower Sitting, 2000. – P. 47–51.

9. Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. М.: Научный мир, 2002. – 196 с.
10. Ammoscato A., Corsale R., Dardanelli G., Scianna A., Villa B. GPS-GIS integrated system for electromagnetic pollution //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. – Vol. XXXVII.– Part B1. – P. 491–498.
11. Abdelati M. Electromagnetic radiation from mobile phone base stations at Gaza //Journal of The Islamic University of Gaza (Natural Sciences Series). – 2005. – Vol.13. – № 2.– P. 129–146.
12. Line P., Cornelius W.A., Bangay M.J., Grollo M. Levels of Radiofrequency Radiation from GSM Mobile Telephone Base Stations. Australian radiation protection and nuclear safety agency, 2000. – 22 p. URL: <http://www.arpansa.gov.au/pubs/eme/rfrep129.pdf> (дата обращения 10.02.09).